

SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS.

DIRECCION GENERAL DE AGUA  
POTABLE Y SANEAMIENTO  
SUBDIRECCION DE FUENTES DE  
ABASTECIMIENTO

ESTUDIO GEOHIDROLOGICO DEL VALLE  
DE AGUASCALIENTES LOCALIDAD OJO  
CALIENTE Y SURESTE DE LA CD. DE  
AGUASCALIENTES 3212

No. DE CONTRATO 079-90



ETEISA, DE C.V.

## TABLA DE CONTENIDO

### RESUMEN EJECUTIVO

I.- GENERALIDADES.....	1
I.1.- Antecedentes.....	1
I.2.- Trabajos Previos.....	1
I.3.- Objetivos.....	6
I.4.- Localización.....	6
I.5.- Fisiografía.....	7
II.- HIDROLOGIA SUPERFICIAL.....	15
II.1.- Análisis Fisiográfico de la Cuenca.....	15
II.2.- Arroyos.....	19
II.3.- Almacenamientos.....	20
II.4.- Análisis Hidrometeorológico.....	21
III.- GEOLOGIA.....	32
III.1.- Marco Geológico Regional.....	32
III.2.- Estratigrafía.....	34
III.3.- Geología Estructural.....	41
III.4.- Geología del Subsuelo.....	48
III.5.- Geología Histórica y Tectónica.....	55
IV.- GEOFISICA.....	57
IV.1.- Introducción.....	57
IV.2.- Exploración Geoeléctrica.....	58
IV.3.- Exploración Gravimétrica.....	71
IV.4.- Integración y Correlación de Información Geoeléctrica, Gravimétrica y Geología del Subsuelo.....	74
V.- GEOHIDROLOGIA.....	76
V.1.- Unidades Hidrogeológicas.....	76
V.2.- Censo de Aprovechamientos.....	80
V.3.- Piezometría.....	82
V.4.- Pruebas de Bombeo.....	83
VI.- HIDROGEOQUIMICA.....	101
VI.1.- Introducción.....	101
VI.2.- Localización y Generalidades de Muestreo.....	103
VI.3.- Clasificación del Agua y Facies Hidrogeoquímicas.....	104
VI.4.- Parámetros Hidrogeoquímicos.....	107
VI.5.- Interpretación de los Constituyentes Químicos.....	116
VI.6.- Evolución Química del Agua Subterránea.....	134
VI.7.- Calidad Química del Agua.....	136
VII.- MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL .....	137
VIII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141

### BIBLIOGRAFIA

### ANEXOS

## RESUMEN EJECUTIVO

Se realizó una Prospección Geohidrológica en el Valle de Aguascalientes, localidad Ojo Caliente y SE del Estado de Aguascalientes, dentro de un área de 273 km<sup>2</sup> delimitada por dos cuadrantes cuyas coordenadas geográficas son: de 21°51'49'' a 21°58'00'' y de 102°11'46'' a 102°16'22'' en el primero, y de 21°43'44'' a 21°51'49'' y de 102°11'46'' a 102°18'43'' en el segundo. El objetivo de este estudio, es el de elaborar un modelo geohidrológico conceptual que permita comprender los factores naturales e inducidos que controlan el flujo del agua en el subsuelo con el fin de determinar sitios favorables para la explotación y los que requieren protección.

Los resultados obtenidos indican los siguiente:

Se desconoce el límite de la Cuenca Geohidrológica. La mayor parte del área se encuentra sobre una secuencia volcano-sedimentaria del Terciario Medio-Tardío, la cual se manifiesta en el pilar tectónico al este de la Ciudad de Aguascalientes. Dicha secuencia es principalmente, el resultado del vulcanismo ácido ocurrido en el Terciario Medio, contemporáneo a procesos erosivos fluviales. Dentro de esta secuencia se identificaron 7 unidades hidrogeológicas de las cuales solo 3 (Secuencias Ignimbríticas del Terciario Medio, Toba Zoyatal y Aluvión del Terciario) son de interés geohidrológico. El flujo subterráneo en la zona es preferencialmente a través de fracturas. El sistema acuífero se encuentra en condiciones de acuífero libre. Las más altas transmisividades se encontraron en la zona de Ojo Caliente y las menores en el pozo Asturias. La dirección preferencial del flujo de aguas subterráneas es de Este a Oeste. Los arroyos Cedazo Paso Hondo y San Nicolás pueden ser considerados zonas de recarga local. La hidrogeoquímica puso de manifiesto dos tipos de flujo hidráulico: el somero de facies bicarbonatada calcio-sódica perteneciente a la Toba Zoyatal y material aluvial, y el profundo de facies bicarbonatada sódica a través de las ignimbritas. La zona más favorable para la explotación se encuentra actualmente al NW del fraccionamiento Ojo Caliente.

I. - G E N E R A L I D A D E S

V. - G E O H I D R O L Ó G I A

## **I . GENERALIDADES**

### **I.1.- ANTECEDENTES**

El presente trabajo es el resultado de la Prospección Geohidrológica que se realizó en el Valle de Aguascalientes, localidad Ojo Caliente y SE del Estado de Aguascalientes.

Existen 95 pozos profundos en la secuencia volcánica de la zona de estudio, de los cuales se extraen aprox.  $31.7 \text{ Hm}^3$  y que fueron perforados por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) . Dichos pozos constituyen la única fuente de abastecimiento para el fraccionamiento de Ojo Caliente y para una parte de la ciudad de Aguascalientes.

A pesar de la creciente demanda de agua en la zona (la cual se pretende satisfacer mediante la perforación de otros pozos), aunada al rápido crecimiento de la población, no existen actualmente estudios encaminados a conocer el potencial y evolución del acuífero en la secuencia volcánica. Es por este motivo que la Dirección de Fuentes de Abastecimiento de la Secretaría de Obras Públicas, en su preocupación por prever una sobreexplotación irreversible del acuífero, contrató a la empresa Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería (E.T.E.I.S.A.), para que realice un estudio encaminado a conocer el potencial del acuífero ubicado al este de la falla oriental del graben de Aguascalientes.

### **I.2.- TRABAJOS PREVIOS**

En el Estado de Aguascalientes se han llevado a cabo, a nivel estatal, diversos estudios, tanto Geológicos como Geohidrológicos. El análisis de trabajos previos se llevó a cabo considerando solamente aquellos cuyas áreas de trabajo coincidieran con la de interés o estuviera muy cercanas a la misma.

De los trabajos recopilados, cumplieron con dicho requisito, los que se resumen a continuación:

1-"Estudios Geohidrológicos en varias localidades del Estado de Aguascalientes" Tomo II (GCA, 1980).

Este estudio estuvo enfocado a determinar las mejores fuentes de abastecimiento de agua potable a las comunidades rurales de Los Durón, El Duraznillo, El Retoño y San Antonio I de los Pedroza (todos dentro del Municipio de Aguascalientes). Dichas localidades están ubicadas al noreste y sureste de la ciudad de Aguascalientes.

2-"Geología de la región central de Aguascalientes" Tesis Delfino Hernández Lascars (UNAM,1979)

La finalidad de este trabajo fué determinar la geología del área Este de la Ciudad, tomando como apoyo los estudios paleontológicos realizados en el área.

3-"Estudios sobre Agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes" José Manuel Aranda Gómez y José Jorge Aranda Gómez (UAA, 1985).

Este estudio fue realizado para cartografiar y determinar los movimientos que regulan el agrietamiento en la Ciudad.

4-"Estudio de Factibilidad Técnica, Económica y Financiera en el Fraccionamiento Satélite-Morelos" (S.O.P.,1990)

Este trabajo tuvo como finalidad realizar un análisis económico para la perforación y equipamiento de tres pozos en el Desarrollo Habitacional Popular "Ciudad Satélite".

El área que comprende éste estudio, se localiza cerca de la Presa el Cedazo, al sur de la Ciudad.

La ubicación de los anteriores trabajos se puede ver en la figura I.2.1

### **Análisis de la Información**

La información de los estudios citados, se analizó de acuerdo a áreas específicas tales como Geología, Geología Estructural, Geofísica, Geohidrología, etc.

#### **Geología.**

La columna regional descrita por la empresa "GCA" 1980, indica que, en gran parte del área estudiada la base de la columna la constituye un paquete de arenisca-conglomerado con un 90 % de clastos de limolita embebidos en matriz arcillo-arenosa. Este paquete ha sido correlacionado con el conglomerado de Guanajuato y Zacatecas por lo que se le asigna una edad Eoceno-Oligoceno.

Sobreyaciendo a este material se encuentra un paquete de riolitas de edad Oligoceno-Mioceno, las cuales se encuentran en ocasiones cubriendo discordantemente a las tobas de edad Terciario- Mioceno, que a su vez se encuentran interdigitadas con un conglomerado arenoso que en el texto no se describe. Se menciona también, un complejo volcánico ácido compuesto por un conglomerado formado por clastos de riolita y tobas, empacado en un material arcillo-arenoso parcialmente cementado al que se le asigna edad Terciario Superior, pero no se especifica su posición estratigráfica con respecto a las rocas anteriores. Para el Cuaternario se diferencian los depósitos aluviales, de pie de monte y residuales.

# UBICACION DE TRABAJOS PREVIOS

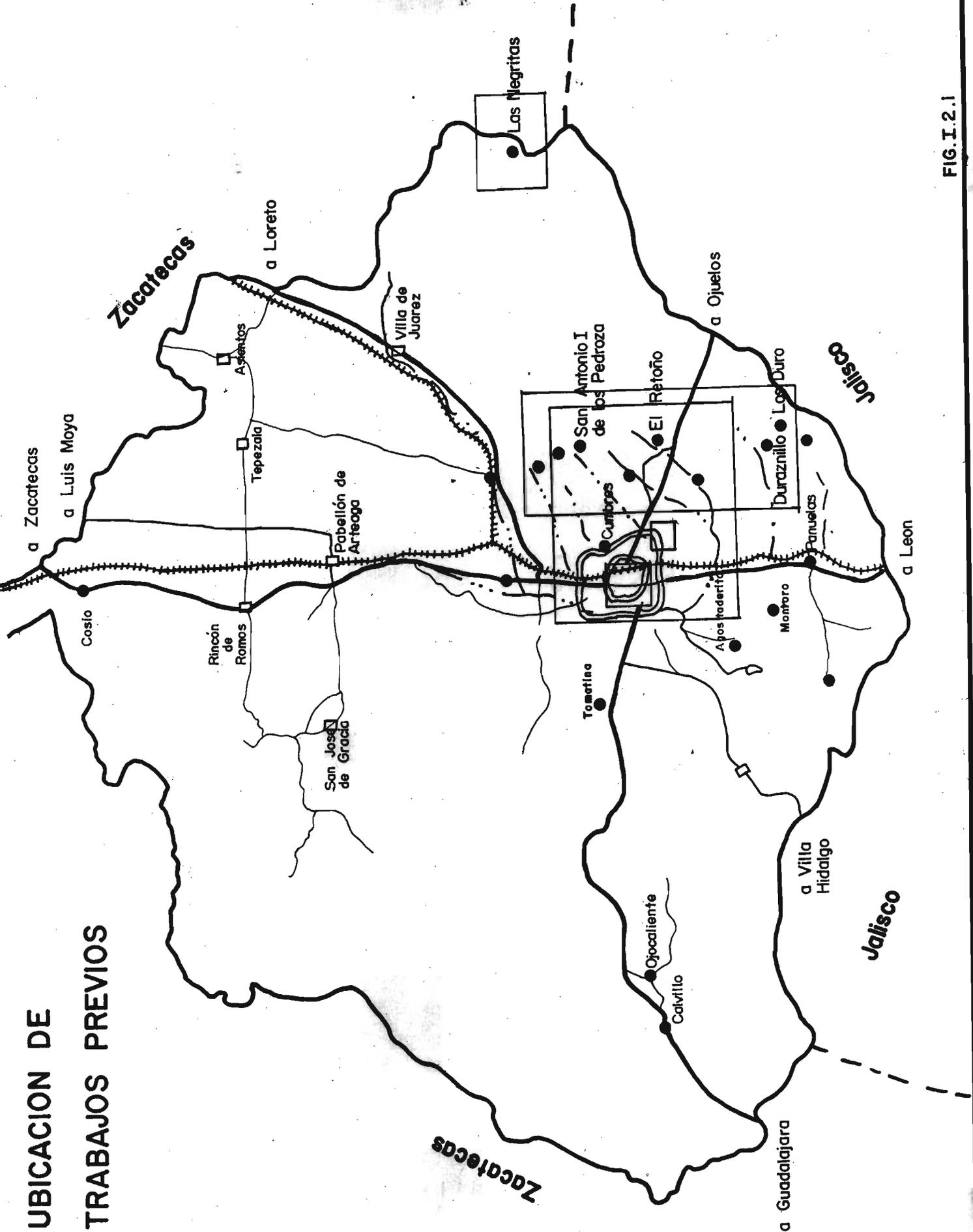


FIG. I.2.1

Este trabajo no menciona específicamente cual es el conglomerado arenoso con el cual se encuentran interdigitadas las tobas, y no se indica la posición estratigráfica que guarda el complejo volcánico ácido con los demás materiales.

S.O.P., 1990, señala que el basamento de la columna regional está integrado por sedimentos psamíticos y calcáreos de edad Jurásica metamorfoseados a esquistos verdes (observados en El Cerrito, El Cabrito, y La Tomatina) sobre los que yacen rocas volcánicas ácidas de composición Riolítica del Oligoceno Superior - Mioceno inferior.

En la porción suroccidental, aflora un conglomerado bien cementado constituido por fragmentos de rocas andesíticas, metamórficas, riolíticas y ocasionalmente intrusivas, embebidos en una matriz de arena fina, el cual sobreyace discordantemente a las rocas extrusivas ácidas.

Sobreyaciendo a las rocas ígneas y conglomerados se encuentran tobas del Mioceno Tardío y Cuaternario.

La unidad tobácea del Terciario conocida como Toba Zoyatal, se extiende en la mayor parte del área de estudio comparándose con la unidad tobácea del Cuaternario, Toba Aguascalientes.

Coronando a estos materiales se encuentran depósitos aluviales, residuales y de pie de monte.

Las observaciones que se hacen de esta columna con respecto a lo observado en campo son las siguientes:

Se menciona un conglomerado sobreyaciendo a las riolitas, que en el campo resultó ser una brecha volcánica compuesta por bloques de Ignimbrita en una matriz vítrea.

Aparte de lo anteriormente mencionado, la columna definida por S.O.P. concuerda bastante con lo visto en campo por ETEISA, pues también se encontró un gran paquete de tobas sobreyaciendo discordantemente a las Ignimbritas y a la brecha, y coronando a estos materiales, depósitos residuales, y aluviales.

De los trabajos analizados, el único que muestra una columna geológica local es la Tesis del Ing. Delfino Hernández Lascars (1979), en la cual se mencionan tres unidades litológicas cuyos nombres informales son, partiendo de la más antigua a la más reciente, "Riolita Ojo Caliente" de edad pre-Mioceno Medio que subyace a la Toba Zoyatal de edad Mioceno Medio y que a su vez infrayace discordantemente a la toba Aguascalientes del Cuaternario.

El estudio de "Agrietamiento en la ciudad de Aguascalientes" (Aranda Gómez, J.M. y J.J., 1985), tiene como principal objetivo determinar las causas del intenso

agrietamiento que sufre la Ciudad de Aguascalientes. Para cumplir tal objetivo, los autores realizaron mediciones de los desplazamientos verticales de las grietas más importantes en la ciudad y plantearon tres hipótesis como posibles causantes del agrietamiento. Dichas hipótesis son:

- Que las grietas son de origen tectónico.
- Que son por sobreexplotación del (o los) acuífero (s)
- Que son por el flujo plástico del suelo impulsado por la gravedad.

El planteamiento de estas hipótesis se hizo sin excluir la posibilidad de que estén actuando de manera conjunta.

Para encontrar más apoyo a su primera hipótesis, los autores realizaron un análisis estructural cubriendo parte de los Estados de San Luis Potosí, Guanajuato y Aguascalientes, este consistió en la interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas así como análisis de información referente al aspecto estructural de la zona. Con ello determinaron que el régimen tectónico dominante durante el Neogeno-Reciente era extensivo.

Dicho estudio se apoyó en levantamientos geológicos en la Tomatina, El Venaderito, Peña Blanca y Tepezalá de los cuales se obtuvo información estructural que fué comparada con la información recabada en el Valle de Ags.

Respecto a la teoría de sobreexplotación, el trabajo carece de apoyo debido a la falta de información sobre el tema. Sin embargo se construyeron siete estaciones de control con cuatro monumentos alineados perpendicularmente a la traza de las grietas, con el fin de determinar si hay o no hundimiento.

No se encontró relación entre los patrones estructurales que afectan las citadas zonas con el que el Valle de Ags.

## Geohidrología

GCA,1980, señala "la existencia de dos acuíferos, el primero constituido por rellenos aluviales y depósitos residuales y el segundo formado por areniscas y conglomerados riolíticos, los cuales se consideran otro tipo de acuífero. Se considera a las rocas volcánicas que flanquean los valles como el basamento de los acuíferos que en ellos se localizan".

Por otra parte, el trabajo de la S.O.P., determina tres acuíferos para su zona de estudio, basando tal determinación en la topografía, Hidrología, Marco Geológico, Calidad del agua, características Hidráulicas del flujo subterráneo y mecanismos de recarga y descarga. Dichos acuíferos son:

- Acuífero Ojo Caliente
- Acuífero Morelos
- Acuífero del Valle de Aguascalientes

En este trabajo se considera que el arroyo El Cedazo, es el límite entre el acuífero Ojo Caliente y Morelos.

Las bases utilizadas por este trabajo para la determinación de los acuíferos no incluyen el aspecto estructural que juega un papel sumamente importante en el control del drenaje tanto superficial como subterráneo.

## Hidrogeoquímica

GCA,1980, dice que el agua en su zona de estudio es de buena calidad, debido a su baja salinidad. S.O.P.,1990, menciona haber determinado la calidad del agua para la zona de Ciudad Satélite pero no especifica parámetros de calidad de esta.

Ambos trabajos proveen resultados de análisis químicos de laboratorio, pero ambos incompletos, además de carecer de un análisis hidrogeoquímico que apoye las conclusiones respecto a la calidad del agua.

## Geofísica

Tanto GCA, como S.O.P., presentan datos de campo de sondeos eléctricos verticales realizados en sus respectivas zonas de estudio, pero no interpretan los datos obtenidos, sino que se limitan a presentar las secciones geoelectricas realizadas.

### **I.3.- OBJETIVOS**

El objetivo del presente estudio es elaborar un modelo geohidrológico conceptual que permita comprender los factores físicos, geológicos y humanos que controlen el flujo del agua en el subsuelo. Con el fin de poder determinar sitios favorables para la explotación y protección del acuífero.

### **I.4.- LOCALIZACION**

La zona de estudio se localiza en el Estado de Aguascalientes, y cubre parte del valle de Aguascalientes (Fig. I.4.1). Está limitada al Norte por los poblados de El Puertecito y El Tanque, al Este por San Antonio I de los Pedroza, Calvillito y Los Melendez; al Sur por la Presa El Muerto y el poblado de Peñuelas y al Oeste por la Ciudad de Aguascalientes, Las Huertas (Las Trojes) y Montoro (Fig. I.4.2).

Cubre un área de 273 Km<sup>2</sup> y puede dividirse en dos cuadrantes; el primero ubicado al este de la Ciudad de Aguascalientes, se localiza entre los paralelos 21<sup>0</sup>51'49", 21<sup>0</sup>58'00" de latitud norte y 102<sup>0</sup>11'46", 102<sup>0</sup>16'22" de longitud oeste. El segundo se encuentra al sur y sureste de la ciudad entre los paralelos 21<sup>0</sup>43'44", 21<sup>0</sup>51'49" de latitud norte y 102<sup>0</sup>11'46", 102<sup>0</sup>18'43" de longitud oeste (Fig. I.4.3)

### **VIAS DE ACCESO**

Carreteras: El estado de Aguascalientes ocupa el tercer lugar de la República Mexicana en cuanto a la densidad de carreteras. Actualmente suma un total de 2,781.8 Km, distribuidos de la siguiente manera: 375.6 en carreteras federales pavimentadas; 297.7 en carreteras estatales pavimentadas, 1,028.2 en caminos rurales revestidos; 189.9 en carreteras estatales revestidas; 25.0 en caminos rurales empedrados y 865.4 en caminos de terracerías y brechas. Estos últimos son transitables sólo en época de estiaje por carecer de obras de drenaje (INEGI, 1990).

Su Capital está comunicada con los estados de San Luis Potosí, Zacatecas y Guadalajara mediante las carreteras federales No. 70, 45 y 54 respectivamente, las cuales atraviesan al estado de norte a sur y de este a oeste.

El área de estudio esta comunicada en su parte central y norte por los caminos de terracería que enlazan a los poblados de La Higuera, San Nicolás de Enmedio, San Nicolas de Arriba y El Tanque, así como caminos revestidos que derivan a partir de la

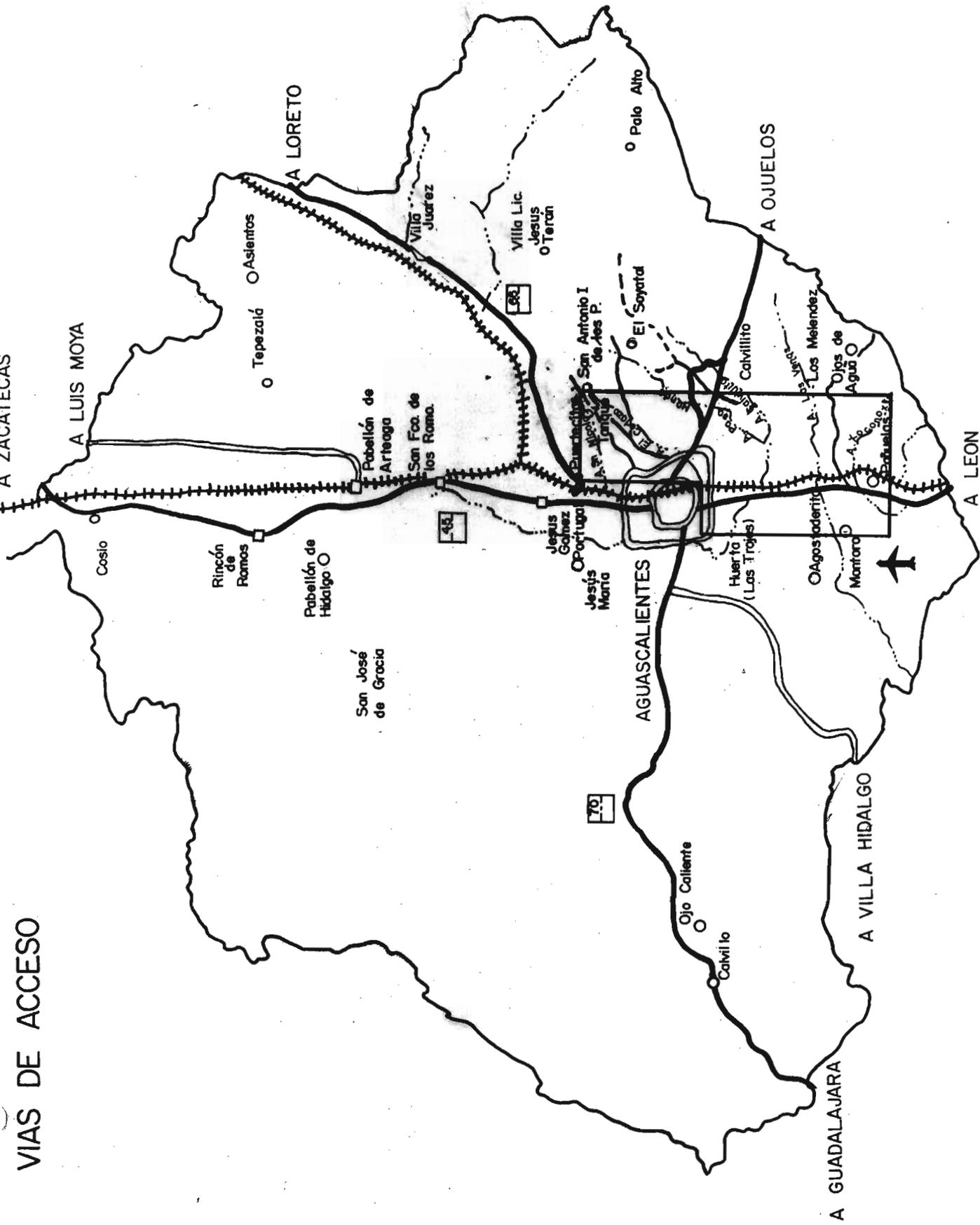


ESC. 1:1 000 000

PLANO DE LOCALIZACION

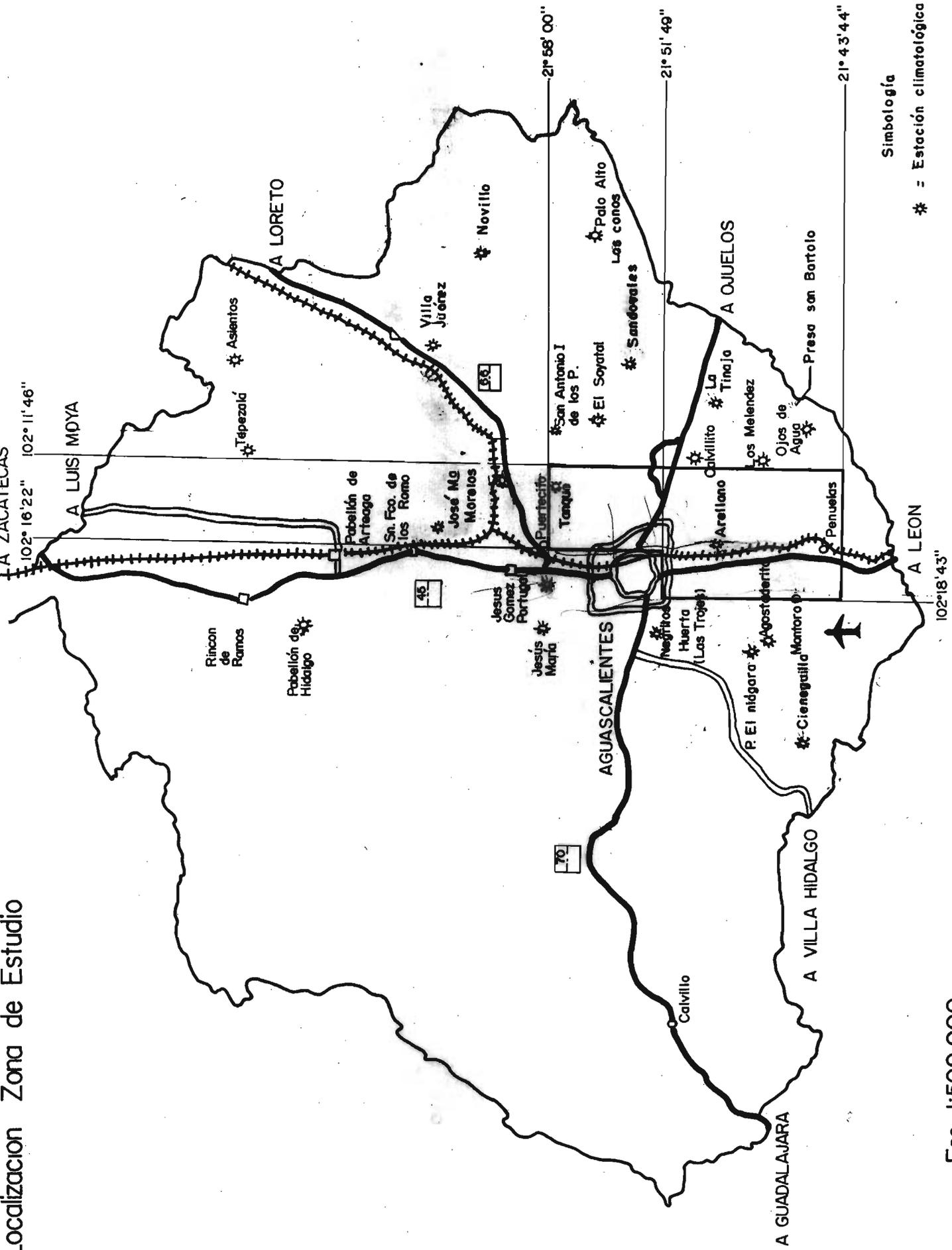
FIG.I.4.1

VIAS DE ACCESO



ESC. 1:500 000

FIG. I. 4.2



Simbología

\* = Estación climatológica

Esc. 1:500 000

FIG. I. 4.3

carretera Federal No. 70, los cuales comunican a los poblados de las Norias de Ojo Caliente, La Herrada, El Conejal, San Antonio I de los Pedroza y El Soyatal.

El principal acceso a la porción sur del área, es por la carretera No. 45 a la cual entroncan varios caminos de terracería que conducen a los poblados Arellanos, Montoro, Cotorina y Peñuelas.

De los caminos de terracería antes descritos derivan brechas y veredas que permiten el acceso, casi en su totalidad a la zona estudiada. (Fig. I.4.2)

**Ferrocarriles:** Aguascalientes posee 212.4 Km de vías ferreas, de los cuales 133.5 pertenecen a la red estatal y el resto como vías alternas (INEGI, 1990).

De Sur a Norte cruza el estado la vía ferrea que va de México a Ciudad Juárez. En la estación Chicalote, ubicada a 15 Km al Norte de la Capital parte un ramal hacia el noroeste que permite el entronque con el ferrocarril México-Laredo.

**Aeropuertos:** La entidad cuenta con un moderno Aeropuerto "Jesus Terán" ubicado al sur de la ciudad de Aguascalientes, y que ofrece el único servicio aéreo comercial del estado con vuelos diarios a México y Tijuana.

## **I.5.-FISIOGRAFIA**

### **PROVINCIAS FISIOGRAFICAS**

De acuerdo con la clasificación de las provincias fisiográficas propuesta por Raisz (1964), el Estado de Aguascalientes se encuentra dentro de dos provincias fisiográficas: La Sierra Madre Occidental y El Altiplano Mexicano o Mesa Central (Fig. I.5.1).

La provincia de la Sierra Madre Occidental, inicia en la frontera con los Estados Unidos, tiene una dirección NW-SW, limitada al sur con la provincia del Eje Neovolcánico, al oeste con las provincias del Desierto Sonorense y Llanura Costera del Pacífico y al este con la provincia de Sierras y Bolsones y la extensión occidental de la Mesa Central y Sierra Madre Occidental.

Hacia el oriente, la Sierra Madre Occidental está constituida por valles y Sierras alargadas de orientación NW-SE, y NE-SW. Esta provincia dentro del Estado de Aguascalientes está representada por la subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos, la cual se localiza al oeste abarcando cerca de 2,634.50 Km<sup>2</sup> del Estado y comprendiendo totalmente los municipios de Calvillo y

# PROVINCIAS FISIOGRAFICAS

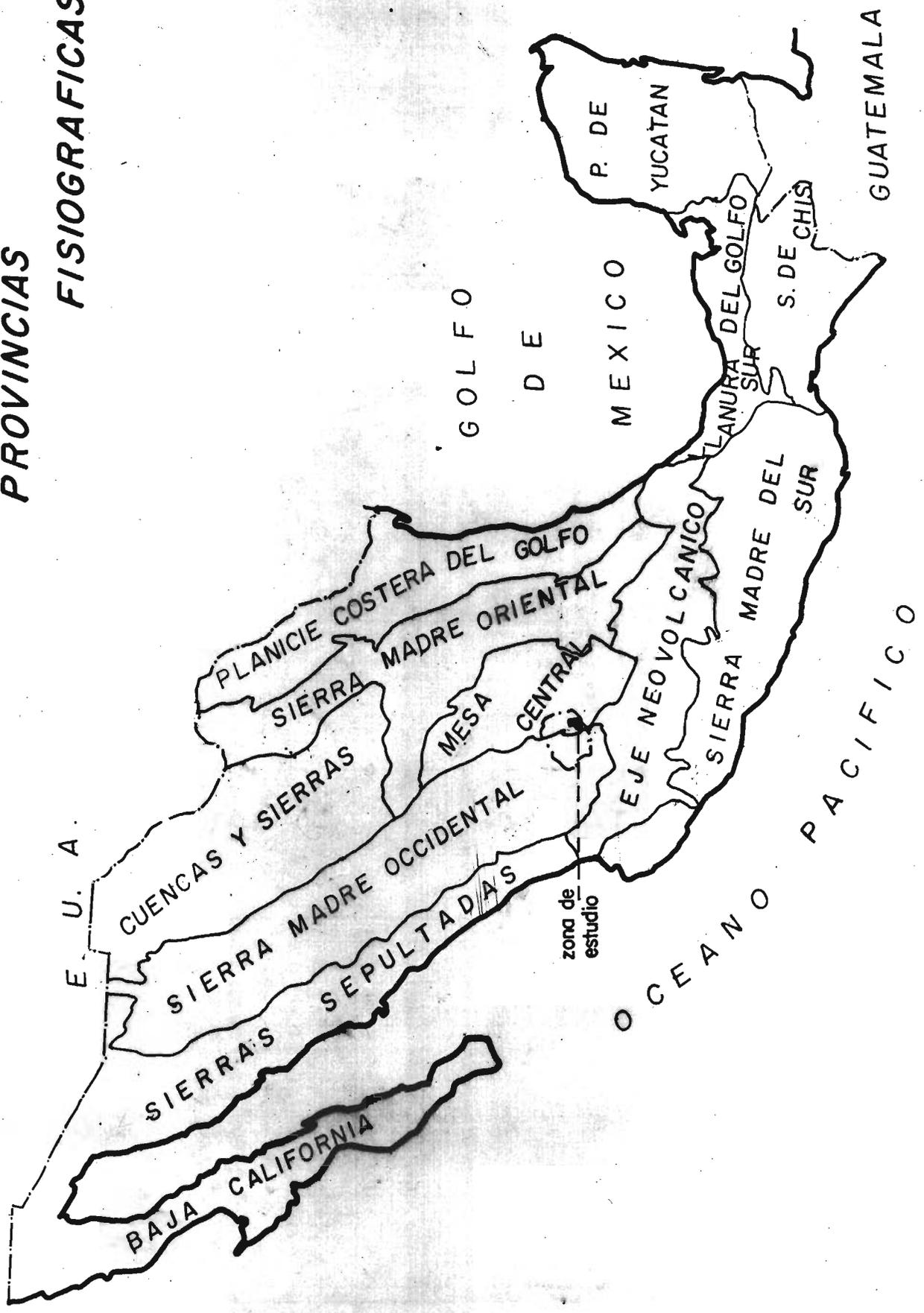


FIG. 5.1

San José de Gracia y parte de los de Aguascalientes, Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga y Rincón de Romos, con drenaje predominante a través de valles hacia el NE.

La provincia de la Mesa Central, limita al N y E con la Sierra Madre Oriental, al W con la Sierra Madre Occidental; al S con la provincia del Eje Neovolcánico. Está formada por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas principalmente de origen volcánico. Dentro del Estado, esta provincia está representada por la subprovincia de los Llanos de Ojuelos, la cual ocupa el extremo este del Estado con 2,331.6 Km<sup>2</sup> incluyendo los municipios de Tepezalá y Asientos totalmente, y en parte los de Jesús María, Pabellón de Arteaga y Rincón de Romos. Dicha provincia está constituida por extensos llanos de altitudes que oscilan entre 2,000 y 2,050 m.s.n.m. caracterizándose por lomeríos redondeados y de pendiente suave. Hay dos llanos de este tipo, El Ojuelos que Aguascalientes comparte con Jalisco y Guanajuato y el de Aguascalientes que se extiende al oriente de la Ciudad. Entre ambos se halla un grupo de mesetas disectadas, cuyas superficies están entre 2,300 y 2,350 m.s.n.m. Hay también algunos altos como el cerro El Espía con 2,600 m de altitud (SPP, 1981)

#### OROGRAFIA

El territorio del Estado de Aguascalientes presenta planicies y sierras como accidentes principales.

Dentro de las planicies más importantes están: El Valle de Aguascalientes, Valle de Chicalote, Valle de Calvillo y la Meseta El Llano.

El Valle de Aguascalientes, es de configuración plana, con suaves lomeríos diseminados en algunas áreas y pendientes que crece hacia las estribaciones de las sierras. Este se inicia desde las cercanías de la Ciudad de Zacatecas bajo el nombre de Valle Ojo Caliente, y es de forma alargada en sentido norte-sur, y ocupa una franja de 80 km de longitud y 17 km de ancho en la parte central del Estado. Está limitado al norte por la zona de Ojo Caliente Zacatecas, al oriente por la sierra de Tepezalá y la Meseta de El Llano, al Sur por la zona de Encarnación de Díaz, Jalisco, y al poniente por la Sierra Madre Occidental.

El Valle de Chicalote, que se localiza al oriente del estado es de forma alargada y tiene una orientación de NE-SW. Su extensión aproximada es de 225 Km<sup>2</sup>, (45 Km de longitud y 5 Km de ancho). Está limitado al norte y al poniente por la Sierra Tepezalá-Asientos, al oriente y sur por la meseta de El Llano y el Valle de Aguascalientes.

El Valle de Calvillo se localiza al suroccidente del estado. Su extensión aproximada es de 135 Km<sup>2</sup>. Presenta topografía de escarpes, excepto en el estrecho valle del río que le da su

nombre y es afluente del río Juchipila. Este valle está separado de los demás, por la sierra que ocupa casi el 40% de la superficie del Estado.

La zona de El Llano, ocupa la porción sureste del estado, es una amplia meseta de 400 Km<sup>2</sup> aproximadamente, muy plana en su parte central, con lomeríos en sus bordes. La elevación media es de 2,000 m.s.n.m. Limitada al norte por la zona de Chicalote, al poniente por el valle del río Aguascalientes y hacia el sur y oriente se extiende en territorio del Estado de Jalisco.

Una planicie menor es el valle de Venadero que ocupa una superficie aproximada de 20 Km<sup>2</sup> de topografía ondulada, la cual se extiende en el flanco oriental de la Sierra Madre Occidental.

#### HIDROGRAFIA

El estado de Aguascalientes se encontrará casi en su totalidad dentro de la Región Hidrológica No. 12 (Lerma-Chapala-Santiago) y solamente una pequeña zona (en el noreste del Estado) se incluye en la Región Hidrológica No. 37 (El Salado), según la clasificación de la Unidad de Aguas Superficiales de la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.).

Las principales corrientes superficiales son los ríos Aguascalientes o San Pedro (que atraviezan al Estado de norte a sur y pertenece a la Subcuenca del Río Verde) y el Calvillo (al sureste del Estado) que forma parte de la Subcuenca del Río Juchipila.

Los principales almacenamientos de agua en el Estado son las presas Calles (al NW de Aguascalientes con una capacidad de  $340 \times 10^6$  m<sup>3</sup>), Abelardo L. Rodríguez (al W de la Ciudad de con  $28.7 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de capacidad), El Niágara (al SW de la Ciudad con capacidad de  $16.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>) y Media Luna (en la parte SW del Estado con  $15 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de capacidad).

El resto de los almacenamientos permanecen por debajo de los  $6.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de capacidad. Son muy abundantes los pequeños almacenamientos improvisados mediante bordos (aljibe), aprovechando la topografía del terreno.

#### CLIMA

El clima predominante en el estado, (según Köppen 1936, modificado por E. García 1974), es semiseco o seco estepario con sus variantes respectivas:

- Semiseco semicálido con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 mm. La lluvia media anual se encuentra entre 500 y 600 mm y la temperatura fluctúa entre los

20 y 18 °C, este tipo de clima se encuentra al centro y sur del Estado en parte de los municipios de Calvillo, Aguascalientes, Jesús María y Asientos.

- Semiseco templado con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación entre 5 y 10.2 mm., la lluvia media anual se encuentra entre los 500 y 600 mm., y la temperatura media anual es superior a los 18°C, este clima se presenta en todos los municipios y es el predominante en la entidad.

#### VEGETACION

Las comunidades vegetales pueden ser utilizadas como una guía práctica en el conocimiento de las características climáticas, tipo de suelos, estabilidad y constitución de las mismas, así como el tipo de drenaje interno y escurrimiento superficial, puesto que de estos factores depende su existencia y proliferación.

Debido a las condiciones de clima, suelo, topografía y temperatura que tipifican la zona, los tipos de vegetación que predomina en el área de estudio son los siguientes:

#### Matorrales

Los matorrales son comunidades vegetales típicas de las zonas áridas y semiáridas del país, compuestas por vegetación arbustiva que generalmente se ramifican desde la base del tallo, cerca de la superficie del suelo y con altura variable, normalmente menor a 4 m. Este tipo de vegetación localizada en las zonas planas y accesibles, es el que más abunda en el paisaje de Aguascalientes, y el que más extensión ocupa dentro de él (UAA, 1984).

De acuerdo a su fisonomía, habitat y composición florística se consideran varios tipos de matorral.

**Matorral Micrófilo Desértico.**- Es un tipo de vegetal formado por elementos arbustivos de hojas o folio pequeño, localizado entre 1,930 y 2,250 m.s.n.m., está constituido por la composición florística: huizache (*Acacia* sp), nopal (*Opuntia* sp), nopal cardón (*O. streptacantha*), mesquite (*Prosopis* sp), nopal tapón (*O. robusta*) y pastos de los géneros *Aristida*, *Boutelova*, *Muhlenbergia* y *Sangregado* (*Jatropha* sp), (SPP, 1981).

**Matorral Crasicuale.**- Es un tipo de vegetación dominado fisonómicamente por cactáceos grandes con talles amplios y cilíndricos, incluyendo las comunidades conocidas como nopales cardonales, se le encuentra entre 1,900 y 2,260 m.s.n.m. (SPP, 1981).

**Matorral Espinoso y Subespinoso.** - Es el tipo de vegetación más frecuente en el Estado localizado en las partes planas de todos los municipios, con un rango altitudinal que va de 1,750 a 2,018 m., con clima semiseco semiárido y seco semiárido, caracterizado por la predominancia de arbustos con espinas como Prosopis, Acacia, Mimosa y otras (UAA, 1984).

#### Mezquital

Los elementos florísticos más representativos de este tipo de vegetación son mezquites y nopal cardon.

#### Vegetación observada en la Zona de Estudio

Al Este de la Ciudad de Aguascalientes se localizan principalmente nopales, matorrales de huizaches y mezquites, gardenches y varadulce. Los pastos son escasos, presentandose en abundancia solo en porciones bajas cercanas a los arroyos y en las zonas altas y de poca pendiente.

En las cercanías a los arroyos Calvillito, Paso Hondo se pueden encontrar magueyes pulqueros, nopales de tuna y mezquites, formando una vegetación más densa que en el resto del lomerío.

En los alrededores de la Presa Pargas se localizan huizaches de más de 8 m. de altura y nopaleras de hasta 4 m.

En El Retoño, población cercana a Calvillito, se observan (además de la vegetación mencionada en los últimos párrafos) algunos romerillos, ocales y pirules. La densidad de la vegetación disminuye conforme se avanza de El Retoño hacia La Tinaja.

En las inmediaciones de la Presa El Cedazo existen pastizales con escasos mezquites.

En Peñuelas (El Cienegal) existe una vegetación densa y muy variada que incluye (además de la vegetación mencionada) numerosos Xoconxtles.

En el Valle de Aguascalientes, al sur de la Ciudad, (cercanías de Cotorina y Montoro), la vegetación está formada principalmente por mezquites, huizaches, castillos, gigantes, higuierilla y pirules.

#### SUELOS

Capa externa de la superficie terrestre fragmentada por la alteración a través de los años. Está formada inicialmente por la desintegración y descomposición de rocas por procesos físicos y químicos e influida por la actividad y la acumulación de diversos residuos de especies biológicas. El suelo puede ser estudiado y descrito de acuerdo a diferentes puntos de vista (Hilliel, Daniel; 1984).

A continuación se enlistan los diferentes tipos de suelos utilizados en la Clasificación de la SPP, 1981, describiendo sus características :

Xerosol háplico (Xh).- Está constituido por una capa superficial de color claro y muy pobre en humus, bajo la que puede haber un subsuelo rico en arcilla o bien semejante a la capa superficial y que a veces presenta manchas, polvo o aglomerado de cal, cristales de yeso o caliche.

Xerosol lúvico (Xl).- Es un suelo de color rojizo o pardo claro, el subsuelo es arcilloso. Este suelo acumula más agua que otro xerosol.

Feozem háplico (Hh).- Se encuentra en todos los sistemas de topografías y se caracteriza por presentar una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes de fertilidad moderada a alta.

Planosol eutrítico (We).- Es un suelo con una capa intermedia decolorada y muy permeable, localizada entre la capa superficial y el subsuelo arcilloso o tepetate, que ocasiona un drenaje diferente, y se encuentra en todos los sistemas de topografías con excepción de las sierras bajas.

Planosol mólico (Wm).- Tiene una capa intermedia decolorada y muy permeable localizadas entre la capa superficial y el subsuelo arcilloso -o tepetate-, lo que provoca deficiencias de drenaje. Su capa superficial, es oscura y rica en humus. Es el más rico de los suelos pertenecientes al grupo de los planosoles.

Litosol (l).- suelo menor de diez centímetros de profundidad, limitado por roca, tepetate o caliche cementado y que se presenta en cinco sistemas de topografías.

Dentro de la zona en estudio se tienen tres tipos de suelos, de acuerdo con la Carta Estatal de Suelos de la SPP, los cuales se presentan como una combinación de dos o más de los tipos mencionados en la clasificación anterior. El tipo de suelo se presenta entonces, como una fórmula constituida por la simbología de cada subtipo, agregándole un último término referente a la clase textural de la unidad.

Xh+1/2Pc

Tienen como suelo principal al Xerosol háplico y como suelo secundario al litosol con textura media (en los 30 cm. superficiales) de una unidad Petrocálcia (Pc). Se encuentra ubicado en la zona de lomeríos teniendo como límite sur el poblado de Cotorina.

#### *Xl+Xh+Hh/2D*

Esta clasificación tiene como suelo principal al Xerosol lúvico, como secundarios al Xerosol háplico y al Feozen háplico con textura media (en los 30 cm. superficiales) de una unidad Dúrica (D) se encuentra ubicado en el valle de Aguascalientes, limitado al sur con el poblado de Arellano.

#### *We+Xh+Wm/2D*

Se encuentra como suelo principal el Planosol eutrítico, como suelo secundario el Xerosol háplico y como suelo terciario el Planosol mólico con una textura media (en los 30 cm. superficiales) de una unidad Durica (D). Se encuentra ubicado en la parte sur de la zona de estudio, desde los poblados de Arellano y Cotorina hasta Peñuelas.

#### Clasificación de horizontes de suelos (S.N. Davis, Hidrogeología, 1968).

Horizonte A.- Tiene coloración que puede ir desde el gris hasta el negro y tiene material fino. Generalmente este horizonte es fácil de excavar con pala y se le conoce también como zona de lixiviación.

Horizonte B.- Es denominado también Zona de Acumulación y puede presentar arcillas, óxidos de hierro, depósitos de minerales como Calcita, gravas cementadas con arcillas y grietas verticales que dan lugar a bloques prismáticos. Es en este horizonte donde la mayoría de los minerales se han transformado en otros o en sales solubles.

Horizonte C.- Es conocido también como zona de Material Parcialmente Descompuesto, ya que se encuentran minerales de la roca original, mientras otros han sido transformados en materiales nuevos.

#### *Observaciones de Campo*

En la mayor parte de la zona de estudio solamente se observa el horizonte C. Los horizontes A y B se ven en lugares muy cercanos a los arroyos principales.

En el Arroyo Don Pascual se observa en ambos costados un horizonte A que va desde la superficie hasta los 3 m. de profundidad, para posteriormente cambiar a un horizonte C.

En los alrededores de la Presa Cedazo no se observan los horizontes A y B, pues solamente hay roca alterada. Solo en las fracturas mas grandes, se observa que los costados de las mismas

son muy diferentes, puesto que en uno de ellos se tiene un horizonte A (color gris-café) de hasta un metro de espesor, mientras que en el otro solo se presenta un horizonte C.

En Calvillito se observa el horizonte A en las cercanías del Arroyo, pasando directamente al horizonte C.

## II.- HIDROLOGIA SUPERFICIAL

## II. HIDROLOGIA SUPERFICIAL .

### II.1 ANALISIS FISIOGRAFICO DE LAS CUENCAS.

#### II.1.1 Introducción.

La magnitud y distribución en el tiempo de un escurrimiento depende de factores climatológicos (como intensidad y duración de la tormenta) y factores físicos de la cuenca (tamaño, forma, pendiente, elevación media y red de drenaje (Campos Aranda, 1987).

Una de las aplicaciones mas útiles del análisis fisiográfico es la predicción de la respuesta hidrológica de una cuenca, tomando como base ciertos parámetros físicos, algunos de los cuales son:

I) Tamaño de la cuenca.- Una cuenca pequeña (entre 4 Km<sup>2</sup> y 130 Km<sup>2</sup>), de acuerdo a V.T. Chow (1962), es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y predominan las características físicas del suelo respecto a las del cauce.

Según el criterio de R. Springal Galindo e I-Pai Wu, una cuenca es pequeña cuando es menor a los 250 km<sup>2</sup> superficie.

II) Forma de la cuenca.- Una cuenca muy alargada tiende a producir un hidrograma con un gasto pico menor que el producido en una cuenca con igual tamaño, pero de forma circular.

Un método para poder estimar la forma de una cuenca es el propuesto por Gravelius y conocido como Coeficiente de Compacidad

#### II.1) Coeficiente de compacidad (Cc)

$$Cc = P/Pc$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca

Pc = Perímetro de círculo con área igual a la cuenca.

Nota: Ver que conforme Cc se aleja de 1.0 la cuenca se hace mas asimétrica.

III) Elevación media de la cuenca .- Se relaciona con las precipitaciones , temperaturas del aire, pendiente del terreno y la densidad de drenaje.

- IV) *Pendiente de la cuenca.- Controla el tiempo del flujo en el terreno e influye directamente en la magnitud de la avenida.*
- V) *Características de la red de drenaje o sistema de cauces.- Influye en la velocidad de drenado y ayuda a inferir las condiciones físicas de la superficie de la cuenca.*
- VI) *Cobertura vegetal.- Influye en el ciclo hidrológico, modificando los procesos de intercepción, infiltración, almacenamiento y evapotranspiración del agua de lluvia, además de modificar la erosión de los suelos.*
- VII) *Suelos.- Afecta al escurrimiento y al transporte de sólidos ya que determinan la vegetación que puede desarrollarse en el lugar y como consecuencia la evapotranspiración y la erosión.*
- VIII) *Longitud y pendiente del cauce principal :*
- a) *Longitud.-Influye en la rapidez de respuesta de una cuenca, a mayor longitud del cauce principal, la respuesta tiende a ser mas lenta.*
- b) *Pendiente.- Se relaciona de manera directamente proporcional con el transporte de sólidos y la velocidad de la avenida.*

## **II.1.2 ANALISIS FISIOGRAFICO DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO**

### **Tamaño de las cuencas.**

*Las cuencas de estudio las podemos clasificar como pequeñas o muy pequeñas de acuerdo al criterio de I-Pai Wu, ya que sus áreas van desde los 6.6 Km<sup>2</sup> (Arroyo Don Pascual) hasta los 201.5 Km<sup>2</sup> (Arroyo San Francisco).*

*Como consecuencia, podemos inferir que el escurrimiento en los cauces es relativamente pequeño y su comportamiento dependerá principalmente de la cobertura vegetal y tipo de suelo.*

*Si se presentan lluvias de alta intensidad ( aunque tengan corta duración ), se puede esperar una respuesta muy rápida en las cuencas Don Pascual, Arellanos, San Nicolás y Xoconoxtle. Las respuestas mas lentas serán en las cuencas San Francisco y Montoro ( ver Plano de Hidrografía ).*

### **Forma de la cuenca.**

Se observa en el plano de Hidrografía que las cuencas tienen forma alargada. Los coeficientes de compacidad varían de 1,225 (A.Xoconoxtle hasta 1.708 (A. Salto de Montoro).

La forma alargada de las cuencas tenderán a producir hidrogramas con tiempos base más grandes y gastos picos pequeños respecto a cuencas con características similares pero de forma circular ( $Cc=1.0$ ). Lo anterior será mas notorio para la cuenca del Arroyo Salto de Montoro y menos perceptible para la cuenca del Arroyo Xoconoxtle ( comparar los coeficientes de compacidad ).

### **Elevación media de las cuencas ( Emc )**

Para obtener las Emc se graficaron las curvas hipsométricas de cada cuenca ( Figuras 2.1 a 2.9 ), se midieron áreas y se estimaron volúmenes bajo las curvas para poder calcular la elevación media de cada cuenca, dividiendo el volumen obtenido entre el área de la cuenca respectiva.

En la Zona de Estudio la Emc no influye de manera importante, ya que contrariamente a lo esperado, las precipitaciones mayores se efectúan en la porción sur del Valle de Aguascalientes y no en las zonas mas elevadas ( ver Plano de Hidrografía y la sección correspondiente a Vientos, que se encuentra dentro del Análisis Hidrometeorológico ).

Nota : Para tener una mejor visión de las características fisiográficas de las cuencas, se dividió la cuenca del arroyo San Francisco (Cuenca VII) en las subcuencas de 'Paso Hondo (Subcuenca V) y Calvillito (Subcuenca VI), pero los cálculos correspondientes se realizaron tomando la cuenca del Arroyo San Francisco (ver Plano de Hidrografía).

### **Modelos de drenajes.**

Los drenajes de las cuencas estudiadas, a excepción del Arroyo Xoconoxtle, son rectangulares, ya que tiene corrientes fluviales con cambios bruscos cercanos a los  $90^0$ , (lo cual pudiera indicar la influencia de estructuras geológicas).

Por su parte el Arroyo Xoconoxtle tiene un drenaje enrejado, lo cual se relaciona con la litología de la zona, que está constituida por brechas volcánica

## **Vegetación**

La vegetación es escasa dentro de la Zona de Estudio ( ver Capítulo I de Generalidades ).

## **Suelos**

La mayor parte de los suelos dentro de la Zona de Estudio son poco permeables ( ver Capítulo I de Generalidades ).

## **Longitud de Cauces Principales**

Las longitudes de los cauces principales son relativamente grandes respecto a las áreas de las cuencas (el cauce principal más pequeño mide 5 km y corresponde al arroyo Don Pascual, mientras que el cauce de mayor longitud es el Salto de Montoro con 25.5 km), por lo que se infiere, que durante las avenidas los tiempos base son mayores respecto a cuencas con características fisiográficas similares pero con cauces principales pequeños (ver Tabla 2.1).

## **Pendientes de los Cauces Principales**

Las pendientes de los cauces principales fueron calculadas dividiendo el desnivel total de cada cauce entre su longitud. De acuerdo a la clasificación propuesta por Heras y basada en las pendientes, los tipos de terrenos de las cuencas son "suaves" ( San Nicolás y Montoro ), "accidentados medios" ( Cedazo y San Francisco ), "accidentados" ( Arellanos y Xoconoxtle ) y "fuertemente accidentados" ( Don Pascual ). La rapidez de respuesta de las cuencas a la lluvia, depende en buena medida de la pendiente del cauce principal, por lo que se espera que las cuencas de los arroyos San Nicolás y Montoro tengan respuestas muy lentas respecto a las de los Arroyos Arellanos, Xoconoxtle y especialmente a la del Arroyo Don Pascual, mientras que las cuencas de los arroyos Cedazo y San Francisco tendrán una respuesta lenta a la precipitación ( respecto a los tres últimos arroyos mencionados), ya que sus pendientes no son muy grandes (ver Tabla 2.1).

## **CONCLUSIONES**

Por las características fisiográficas mencionadas, se espera que las respuestas de las cuencas a la precipitación sean rápidas en los arroyos Don Pascual Arellanos y Xoconoxtle, pero con caudales máximos pequeños. Las respuestas más lentas se presentarán en los arroyos Salto de Montoro y San Francisco.

## **RECOMENDACIONES**

Se sugiere instalar por lo menos una sección de control sobre el arroyo Cedazo (ya que sus características fisiográficas son las que representan de mejor manera las condiciones fisiográficas de la Zona de Estudio) para tomar lecturas de tirantes de agua y así conocer la Relación Lluvia - Esgurrimiento de la cuenca, la cual servirá de base para inferir las relaciones correspondientes a las otras cuencas.

Otra alternativa es la instalación de escalas en distintos puntos dentro de una presa para poder calcular mediante curvas Elevaciones-Gastos el volumen escurrido que ingresa con cada tormenta (se sugiere realizarla en la Presa Pargas y no en la Presa Cedazo, ya que esta última puede ser seriamente afectada por los cambios en los escurrimientos que se presentan como resultado de la urbanización).

## **II.2 ARROYOS**

### **II.2.1 Ubicación de las Cuencas**

En el Plano de Hidrología Superficial se observa que las Cuencas de los Arroyos sobrepasan el Area de Estudio ( que definió inicialmente la S.O.P. del Gobierno del Estado de Aguascalientes ) y pertenecen a la Subcuenca 12-B ( La Laja ), que forma parte de la Región Hidrológica 12 ( Lerma - Chapala - Santiago ), según la Clasificación de Cuencas y Subcuencas de la Unidad de Aguas Superficiales perteneciente a la Comisión Nacional del Agua.

### **II.2.2 Características de las Corrientes de Agua Superficiales**

Las principales corrientes superficiales son efímeras y encauzadas por los arroyos San Nicolás, Arellanos, Don Pascual, Cedazo, San Francisco ( que incluye a los arroyos Paso Hondo y Calvillito), Salto de Montoro y Xocoxtle ( ver Plano de Hidrología Superficial ).

Es conveniente aclarar que algunos arroyos ( como El Cedazo y El San Francisco ) tienen caudal todo el año en las cercanías del Valle de Aguascalientes, pero se cree que este es consecuencia principalmente del flujo subsuperficial provocado por el riego en las áreas de cultivo ( lo cual es fácilmente visible en los costados del Arroyo Paso Hondo ) y de las aguas de desecho doméstico e industrial.

Debido a los inconvenientes mencionados anteriormente, no es recomendable el aforo de esas corrientes para encontrar una relación lluvia - escurrimiento. Lamentablemente no se dispone de estaciones hidrométricas dentro de la Zona de Estudio que permitan calibrar métodos de relación lluvia - escurrimiento para posteriormente transportar esta relación a otras cuencas similares dentro del área de interés del presente estudio.

### II.3 ALMACENAMIENTOS

Los almacenamientos en la zona son pequeños en comparación con otros dentro del mismo Estado de Aguascalientes.

Los principales almacenamientos de las Cuencas de Estudio son:

OBRA	CORRIENTE	CAPACIDAD (Hm <sup>3</sup> )
Presa Gringos	A. Los Arellano	0.1
*Presa Grullas	A. San Francisco	1.2168
Presa Cedazo	A. Cedazo	1.0
*Presa San Fco. de Los Viveros	A. San Francisco	0.25
Presa Muerto 2	A. El Convento	1.281
Presa Pargas	A. Calvillito	0.5

\* Almacenamiento fuera de la Zona de Estudio delimitada por S.O.P. pero dentro de las cuencas de los arroyos estudiados.

Nota : Los datos de la capacidad de almacenamiento fueron proporcionados por la Gerencia Estatal en Aguascalientes de la Comisión Nacional del Agua y está dada en hectómetros cúbicos, es decir, millones de metros cúbicos.

La superficie libre del agua en los almacenamientos permitirá estimar el volumen anual evaporado.

La gran cantidad de pequeños almacenamientos o jagüeyes lleva a pensar que la permeabilidad vertical del terreno es pequeña y que la recarga del agua subterránea quizá se efectúa principalmente por permeabilidad secundaria (fracturas en rocas) y en menor proporción por la permeabilidad primaria de las rocas que se encuentran aflorando, o bien por flujo subterráneo desde zonas alejadas de la Zona de Estudio.

### SUGERENCIAS

Se recomienda la instalación de escalas en las presas para poder calcular los cambios en el almacenamiento de los vasos, debidos a los escurrimientos.

## II.4 ANALISIS HIDROMETEOROLOGICO

### II.4.1 Recopilación de información climatológica.

En la Cd. de México se recopilaron datos de registros de precipitación mensual acumulada y de evaporación mensual acumulada para el período 1981 a 1989 de veinte Estaciones Climatológicas.

En la Cd. de Aguascalientes la C.N.A. del Estado, facilitó los registros pluviométricos y de evaporación de otras 27 estaciones climatológicas.

Se visitaron las estaciones climatológicas (pertenecientes a la C.N.A.) ubicadas en las poblaciones de Arellano, Calvillito, Sandoval, Montoro y San Francisco de los Viveros.

A continuación se describen las características de cada una de las Estaciones Climatológicas visitadas:

Estación	Latitud	Longitud	Equipo	Observaciones:
Arellano	21° 48' 00" N	102° 16' 39" E	T Va E P	Hierba y grava alrededor del evaporímetro.
Calvillito	21° 49' 36" N	102° 11' 21" E	T Va E P	Evaporímetro con basura y poste de veleta inclinado
Sandoval	21° 53' 08" N	102° 06' 34" E	T Va E P	Evaporímetro con basura. Hierbas largas en la estación
Montoro	21° 46' 39" N	102° 17' 30" E	T Va E P	Evaporímetro con basura.
S.Fco.Los Viveros	21° 54' 41" N	102° 07' 33" E		Desmantelada

#### Simbología:

T = Termómetro de máxima y mínima.

Va = Veleta con anemómetro.

E = Evaporímetro.

P = Pluviómetro.

En la ecuación I, se observa que los excedentes son la diferencia existente entre la Precipitación y la Evapotranspiración Real, o sea :

$$Ex = P - ETR$$

Los excedentes de agua escurrirán o se infiltrarán, es decir :

$$\text{Excedentes} = \text{Escurrimiento} + \text{Infiltración}$$

$$Ex = E + I$$

#### II.4.3.4.1 **ESCURRIMIENTOS.**

Se llama escurrimiento al flujo resultante que se presenta sobre la superficie de la cuenca o debajo de ella como resultado de la precipitación y tiende a llegar a los cuerpos de agua interiores (presas, lagos, etc.) o al mar.

Existen tres tipos de escurrimientos, denominados Superficial, Sub-superficial y Subterráneo. El escurrimiento superficial es aquel que viaja sobre la superficie del terreno hacia los cauces.

El escurrimiento Subsuperficial o Hipodérmico (interflujo) se mueve en horizontes cercanos a la superficie del suelo dentro de la zona de alteración y en dirección horizontal, para posteriormente aflorar en los cauces, sin haber formado parte del almacenamiento del acuífero durante todo el proceso de escurrimiento.

El escurrimiento subterráneo es aquel que se presenta dentro de los materiales del subsuelo y en algún momento ha contribuido al almacenamiento de agua del acuífero.

#### **Principales factores que afectan al escurrimiento.**

- 1) F. Climáticos (precipitación, evapotranspiración, etc.).
- 2) F. Fisiográficos (tamaño, pendiente y altitud de la cuenca, además del tipo de suelo y roca por donde viaja el escurrimiento ).
- 3) F. Meteorológicos:
  - Tipo de precipitación (líquida, sólida, agua, nieve, etc.)
  - Intensidad de la precipitación (se relaciona de manera directamente proporcional al escurrimiento).
  - Duración de la precipitación ( a mayor duración corresponde un mayor escurrimiento).
  - Distribución y trayectoria de la precipitación de la cuenca.
- 4) Déficit de humedad del suelo

Apoyandose en tablas, se determinaron los valores de "e" y "e<sub>g</sub>". El valor de "c" se estimó en 0.4, ya que se trata de embalses relativamente pequeños.

De acuerdo a los registros de velocidad de vientos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, el Número de Registro a lo largo del año es de "2" ( en casi todos los meses del periodo que abarca de 1980 a 1985 ), o sea viento moderado con una velocidad entre 3.4 y 7.9 m/s . Para realizar los cálculos se consideró que la velocidad del viento era de 5 m/s a 4 m. de altura sobre el terreno y de 3 m/s a 10 cm. de altura (\*).

\* La velocidad de 3 m/s fué obtenida por medio de la siguiente Fórmula :

$$V = V_1 * (Z/Z_1)^k$$

Donde :

$$k = 0.143$$

$$V_1 = 5 \text{ m/s}$$

$$Z = \text{altura a la que se calcula } V_1 = 0.1 \text{ m.}$$

$$Z_1 = \text{altura a la cual se dispone de información} = 4 \text{ m.}$$

#### **CALCULO DE LA EVAPORACION EN LOS EMBALSES DE LAS CUENCAS**

En la Tabla 2.3 se encuentran los valores utilizados para el cálculo de la evaporación en embalses.

La evaporación mensual se obtuvo multiplicando la evaporación diaria por el número de días del mes correspondiente.

$$E_{\text{mes}} = E * (\text{Número de días del mes})$$

La superficie de agua en los embalses suma 6.925 km<sup>2</sup>, entonces el volumen anual evaporado en los embalses (V<sub>aee</sub>) es :

$$V_{\text{aee}} = (268.3 \times 10^{-3} \text{ m/año}) * (6.925 \times 10^6 \text{ m}^2) = 1.86 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\underline{\underline{V_{\text{aee}} = 1.86 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}}}$$

El volumen anual evapotranspirado ( $V_{ETR}$ ) es :

$$V_{ETR} = ETR * A$$

Donde :

A = Area de las cuencas

Sustituyendo los valores calculados :

$$V_{ETR} = ( 431.96 \times 10^{-3} \text{ m } ) ( 443.1 \times 10^6 \text{ m}^2 ) = 191.39 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

$$\underline{\underline{V_{ETR} = 191.39 \text{ Hm}^3/\text{año}}}$$

Nota : Es conveniente aclarar que la ETR no se puede calcular utilizando el Método de Coutagne, ya que la magnitud de la precipitación no se encuentra dentro del rango de aplicación recomendado para este criterio.

#### II.4.3.3 EVAPORACION EN LOS EMBALSES

La evaporación en los embalses fué estimada mediante la fórmula de R.E. Horton que a continuación se describe :

$$E = c \{ [ 2 - \exp(-0.447V_o) ] [ e_s - e ] \}$$

Donde :

E = Evaporación diaria en embalses ( $\text{mm}/\text{día}$ ) .

$V_o$  = Velocidad del viento sobre la superficie del agua

c = Coeficiente que depende del tamaño del embalse

$e_s$  = Presión de vapor de saturación (a la temp. del agua superficial ( $\text{mm}_{\text{Hg}}$ ))

e = Presión de vapor de aire

La evaporación se calculó conjuntamente para todas las cuencas en estudio, tomando el promedio de las temperaturas registradas en las Estaciones Climatológicas de Arellanos, Peñuelas, Montoro y Sandovalés.

Apoyándose en tablas, se determinaron los valores de "e" y " $e_s$ ". El valor de "c" se estimó en 0.4, ya que se trata de embalses relativamente pequeños.

## **II.4.2 CLIMATOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **II.4.2.1 Estaciones Climatológicas**

Actualmente solo existen dos Estaciones Climatológicas en el area de estudio ( Arellano y Montoro ) y otras 2 que colindan con la Zona ( Peñuelas y Calvillito ), por lo cual se recurrió al auxilio de los registros de las estaciones mas próximas, como son, Jesús María, San Francisco de Los Romos, José María Morelos, Villa Juarez, El Novillo, Los Conos, Sandoval, La Tinaja, Presa San Bartolo, Presa El Niágara, Los Negritos y Cieneguilla ( ver Figura I.4.3 ).

### **II.4.2.2 Clasificación del Clima**

Según el Sistema de Clasificación de Köppen, modificado por Enriqueta García para la Republica Mexicana, el clima es estepario o semidesértico (BS1kE), o sea templado con verano cálido y lluvia invernal entre los 5 y 10.2mm.

### **II.4.2.3 Temperatura**

La temperatura media anual en el área de estudio es de 18° C, presentándose la temperatura mínima en el mes de enero (12.2° C) y la temperatura máxima en mayo y junio con 21° C.

### **II.4.2.4 Precipitación**

La precipitación anual acumulada ( basada en los registros de las estaciones climatológicas mencionadas anteriormente ) es de 449.7 mm de acuerdo a la ponderación realizada con base en el Plano de Isoyetas.

Las precipitaciones mínimas se presentan en el mes de marzo (1mm) y las máximas en julio y agosto (110mm).

Durante el análisis de registros pluviométricos para la elaboración de Isoyetas de lluvia anual acumulada ( ver Plano de Hidrografía ) se comprobó mediante la Prueba Estadística de Helmer la falta de homogeneidad en los datos de la Estación Climatológica de Calvillito, por lo cual no se apoyó el trazado de las Curvas Isoyetas en los registros de dicha Estación.

No se consideró conveniente corregir los datos de la Estación Climatológica Calvillito, ya que no existe una tendencia clara de una sobreestimación o una subestimación de los registros del pluviometro, sino que aparenta tratarse de descuidos frecuentes por parte del operador encargado en la Estación.

#### II.4.2.5 Vientos

Los vientos dominantes tienen dirección noreste en la mayor parte de las estaciones, pero se observa la existencia de una corriente de aire con dirección suroeste, que pasa por la Estación José María Morelos ( en Cañada Honda ). Los vientos del Noreste y del Suroeste chocan en las cercanías del Valle de Aguascalientes y producen aquí las mas altas precipitaciones dentro de la Zona de Estudio ( ver Plano de Hidrografía ).

#### CONCLUSIONES

Los registros de las Estaciones Climatológicas no reflejan adecuadamente las condiciones climatológicas de la Zona de Estudio, ya que existe negligencia de algunos operadores y el casi nulo mantenimiento por parte de las Instituciones encargadas de las mismas.

#### RECOMENDACIONES

Se sugiere mejorar el mantenimiento y la reparación de las Estaciones Climatológicas, además de inspeccionar periodicamente a los operadores de Estación, para evitar errores por negligencia.

Es conveniente tomar en cuenta las condiciones del U.S. Weather Bureau ( U.S.A ) para el correcto funcionamiento de los "Evaporímetros Clase A" (que son los utilizados dentro de la Zona de Estudio), los cuales deben tener una separación respecto al suelo de 5 a 10 cm., para permitir la libre circulación del aire por debajo de los mismos, además deberán de encontrarse libres de hierba a su alrededor.

#### II.4.3 BALANCE HIROLOGICO SUPERFICIAL

##### II.4.3.1 ECUACION DE BALANCE HIDROLOGICO SUPERFICIAL

La Ecuación General de Balance Hidrológico Superficial se expresa en su forma más sencilla como :

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración Real} + \text{Excedentes}$$

---

$$P = ETR + Ex \dots\dots\dots I$$

---

Dentro del presente Estudio se conoce el valor de la precipitación anual acumulada y se estimó el de la evapotranspiración mediante el Metodo de Turc.

#### II.4.3.2 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL (DEFICIT DE ESCURRIMIENTO)

METODO DE TURC ( ver TABLA 2.2 )

Según Turc, mediante observaciones a nivel mundial en climas muy variados, la evapotranspiración real puede estimarse con la siguiente fórmula :

$$ETR = P / (0.9 + P^2 / L^2)^{0.5} \quad \text{y} \quad L = 300 + 25T + 0.05 T^3$$

Donde :

P = Precipitación (mm)

ETR = Evapotranspiración real (mm)

T = Temperatura (°C)

L es un factor de temperatura y estará limitada, ya que si  $P < 0.31 * L$ , la evapotranspiración real (ETR) sería mayor que la precipitación, entonces consideramos a  $ETR = P$ .

La diferencia entre lo medido y lo calculado es mayor cuando mas características excepcionales tenga la cuenca (fuerte insolación, tamaño pequeño, cuenca de montaña, etc.).

Nota: Este método da mejores resultados cuando se aplica a zonas cálidas y húmedas que en las regiones secas.

La evapotranspiración real (considerando que el incremento o el decremento en la reserva de agua aprovechable por la vegetación, es despreciable) durante nuestro año de balance es :

$$ETR = P - Ex$$

Donde :

P = Precipitación

Ex = Excedente de agua (escurrimientos e infiltraciones)

ETR = Evapotranspiración real

La evapotranspiración real calculada mediante el método de Turc ( ver TABLA 2.2 ) tiene el valor de 431.96 mm/año,

El volumen anual evapotranspirado (  $V_{ETR}$  ) es :

$$V_{ETR} = ETR * A$$

Donde :

A = Area de las cuencas

Sustituyendo los valores calculados :

$$V_{ETR} = ( 431.96 \times 10^{-3} \text{ m} ) ( 443.1 \times 10^6 \text{ m}^2 ) = 191.39 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

$$\underline{V_{ETR} = 191.39 \text{ Hm}^3/\text{año}}$$

Nota : Es conveniente aclarar que la ETR no se puede calcular utilizando el Método de Coutagne, ya que la magnitud de la precipitación no se encuentra dentro del rango de aplicación recomendado para este criterio.

#### II.4.3.3 EVAPORACION EN LOS EMBALSES

La evaporación en los embalses fué estimada mediante la fórmula de R.E. Horton que a continuación se describe :

$$E = c \{ [ 2 - \exp(-0.447V_o) ] [ e_s - e ] \}$$

Donde :

E = Evaporación diaria en embalses ( $\text{mm}/\text{dia}$ )

$V_o$  = Velocidad del viento sobre la superficie del agua

c = Coeficiente que depende del tamaño del embalse

$e_s$  = Presión de vapor de saturación (a la temp. del agua superficial ( $\text{mmHg}$ ))

e = Presión de vapor de aire

La evaporación se calculó conjuntamente para todas las cuencas en estudio, tomando el promedio de las temperaturas registradas en las Estaciones Climatológicas de Arellanos, Peñuelas, Montoro y Sandovalés.

De acuerdo a los registros de velocidad de vientos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, el Número de Registro a lo largo del año es de "2" ( en casi todos los meses del periodo que abarca de 1980 a 1985 ), o sea viento moderado con una velocidad entre 3.4 y 7.9 m/s . Para realizar los cálculos se consideró que la velocidad del viento era de 5 m/s a 4 m. de altura sobre el terreno y de 3 m/s a 10 cm. de altura (\*).

\* La velocidad de 3 m/s fué obtenida por medio de la siguiente Fórmula :

$$V = V_1 * (Z/Z_1)^k$$

Donde :

$$k = 0.143$$

$$V_1 = 5 \text{ m/s}$$

$$Z = \text{altura a la que se calcula } V_1 = 0.1 \text{ m.}$$

$$Z_1 = \text{altura a la cual se dispone de información} = 4 \text{ m.}$$

#### **CALCULO DE LA EVAPORACION EN LOS EMBALSES DE LAS CUENCAS**

En la Tabla 2.3 se encuentran los valores utilizados para el cálculo de la evaporación en embalses.

La evaporación mensual se obtuvo multiplicando la evaporación diaria por el número de días del mes correspondiente.

$$E_{\text{mes}} = E * (\text{Número de días del mes})$$

La superficie de agua en los embalses suma 6.925 km<sup>2</sup>, entonces el volumen anual evaporado en los embalses (V<sub>ae</sub>) es :

$$V_{ae} = (268.3 \times 10^{-3} \text{ m/año}) * (6.925 \times 10^6 \text{ m}^2) = 1.86 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\underline{\underline{V_{ae} = 1.86 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}}}$$

#### **II.4.3.4 EXCEDENTES**

#### II.4.3.4 EXCEDENTES

En la ecuación I, se observa que los excedentes son la diferencia existente entre la Precipitación y la Evapotranspiración Real, o sea :

$$Ex = P - ETR$$

Los excedentes de agua escurrirán o se infiltrarán, es decir :

$$\text{Excedentes} = \text{Esgurrimiento} + \text{Infiltración}$$

$$Ex = E + I$$

##### II.4.3.4.1 ESCURRIMIENTOS.

Se llama escurrimiento al flujo resultante que se presenta sobre la superficie de la cuenca o debajo de ella como resultado de la precipitación y tiende a llegar a los cuerpos de agua interiores (presas, lagos, etc.) o al mar.

Existen tres tipos de escurrimientos, denominados Superficial, Sub-superficial y Subterráneo. El escurrimiento superficial es aquel que viaja sobre la superficie del terreno hacia los cauces.

El escurrimiento Subsuperficial o Hipodérmico (interflujo) se mueve en horizontes cercanos a la superficie del suelo dentro de la zona de alteración y en dirección horizontal, para posteriormente aflorar en los cauces, sin haber formado parte del almacenamiento del acuífero durante todo el proceso de escurrimiento.

El escurrimiento subterráneo es aquel que se presenta dentro de los materiales del subsuelo y en algún momento ha contribuido al almacenamiento de agua del acuífero.

##### Principales factores que afectan al escurrimiento.

- 1) F. Climáticos (precipitación, evapotranspiración, etc.).
- 2) F. Fisiográficos (tamaño, pendiente y altitud de la cuenca, además del tipo de suelo y roca por donde viaja el escurrimiento).
- 3) F. Meteorológicos:
  - Tipo de precipitación (líquida, sólida, agua, nieve, etc.)
  - Intensidad de la precipitación (se relaciona de manera directamente proporcional al escurrimiento).

- Duración de la precipitación ( a mayor duración corresponde un mayor escurrimiento).

- Distribución y trayectoria de la precipitación de la cuenca.

4) Déficit de humedad del suelo

5) F. Humanos

a) Estructuras Hidráulicas (principalmente presas y aljibes).

b) Agricultura (obras de riego, drenaje y deforestaciones o reforestaciones.

c) Urbanización (la cual disminuye la infiltración y acelera el escurrimiento mediante el sistema de drenaje urbano).

#### **VOLUMEN ANUAL ESCURRIDO.**

Cuando se carece de estaciones hidrométricas dentro de la Zona de Estudio, se puede inferir el régimen hidrológico de las corrientes de agua por distintos métodos, basados en el transporte de información hidrométrica de una estación de aforos cercana o bien métodos basados en la información climatológica.

Debido a que las cuencas aforadas cercanas a nuestra zona de estudio tienen características fisiográficas y morfológicas muy distintas a las de nuestra área de interés, no se aplicaron métodos de transporte de información hidrométrica, por lo cual se eligieron métodos basados en información climatológica.

De acuerdo a las características fisiográficas de las cuencas, al suelo poco permeable y la baja densidad de vegetación, se espera que las respuestas de las cuencas a la precipitación sean rápidas y los gastos pico pequeños.

Es conveniente aclarar que una parte de los escurrimientos (E) queda retenido en los almacenamientos ( jagüeyes o aljibes ) y el resto seguirá circulando hasta la salida de la cuenca ( $E_S$ ).

$$E = E_{AL} + E_S$$

$E_{AL}$  = Lámina del escurrimiento que es retenida por los embalses

El volumen de escurrimiento que es interceptado en los jagüeyes en un año lo consideramos igual al volumen evaporado en ellos durante el mismo periodo, ya que se consideró constante el volumen de agua almacenado en un año en este tipo de estructuras entonces :

$$V_{ALM} = V_{aee} = \text{Volumen anual evaporado en los embalses}$$

Los coeficientes de escurrimiento (CE) para cada una de las cuencas (ver Tabla 2.4), fueron obtenidos basandose en sus características fisiográficas, factores climáticos y humanos.

El volumen escurrido hasta la salida de las cuencas ( $V_{Sal}$ ) será igual a la diferencia entre el escurrimiento "E" y el escurrimiento almacenado en los aljibes " $V_{ALM}$ " (ver Tabla 2.4), o sea :

$$V_{Sal} = E - V_{ALM}$$

Debido a que el volumen almacenado es pequeño (respecto al volumen escurrido "E"), los valores de los volúmenes escurridos que llegan hasta la salida " $V_{Sal}$ ", son casi iguales a los valores de escurrimientos "E" (ver Tabla 2.4).

### **INFILTRACION**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo y queda retenido en él o alcanza un manto acuífero, incrementandolo ( Campos, 1987 ).

La Capacidad de Campo de un suelo (C.C.) es la máxima cantidad de agua que puede retener un suelo contra la gravedad. Cuando un suelo ha alcanzado su C.C., el agua en exceso tiende a seguir infiltrandose, ya que no puede ser retenida por el mismo.

A la diferencia existente entre la C.C. y el contenido de humedad de un suelo en un momento dado se le conoce como Deficiencia de Humedad del Suelo ( D.H.S. ). Es comprensible que cuando el agua se infiltra en el suelo, no siempre contribuye a la recarga de los acuíferos, ya que su primer obstaculo será satisfacer la Deficiencia de Humedad del Suelo.

La infiltración puede ser consecuencia de la precipitación y el escurrimiento en las cuencas ( $V_{infnat}$ ), o bien deberse a las actividades u obras humanas (I-art). La infiltración artificial (I-art) en la Zona de Estudio es debida principalmente al riego en las zonas de cultivo y a las fugas que se presentan en la red de distribución del agua ( los suelos de los aljibes se les considera impermeables, es decir su infiltración se considera nula para fines prácticos ) . Por lo anteriormente mencionado, para poder conocer el volumen total de agua infiltrada artificialmente, se requiere estimar los volúmenes de infiltración por riego y de infiltración por fugas en la red de abastecimiento de agua potable.

La infiltración natural ( $V_{infnat}$ ) (ver Tabla 2.4), se obtuvo de la Ecuación de Balance, es decir:

$$V_{\text{infnat}} = P - ( E_{\text{TR}} + E_{\text{AL}} + E_{\text{S}} )$$

Lamentablemente no se dispone de pruebas con infiltrómetros o lisímetros en la Zona, que nos permitan conocer la permeabilidad del suelo.

### RESULTADOS DEL BALANCE HIDROLOGICO SUPERFICIAL

Los resultados del balance del balance medio anual de hidrológica superficial para las cuencas de interés son :

ENTRADAS (Hm <sup>3</sup> /año)	SALIDAS (Hm <sup>3</sup> /año)
Precipitación = 202.38	Es = 3.6
	V <sub>ETR</sub> = 191.39
	V <sub>ae</sub> = 1.86
	V <sub>infnat</sub> = 5.53

### INFILTRACION ARTIFICIAL

La infiltración artificial por riego (V<sub>infr</sub>) se estimó igual al 25% del total del volumen extraído para riego en la zona de lomeríos (12.3 Hm<sup>3</sup>) y en un 35% del total utilizado para riego (2.3 Hm<sup>3</sup>) en la zona del Valle.

El volumen infiltrado por riego se calculó, obteniéndose como resultado :

$$V_{\text{infr}} = 3.88 \text{ Hm}^3$$

-----

Respecto a la red de distribución de agua potable, se consideró que un 10% del volumen total extraído al este de la Ciudad de Aguascalientes se infiltra (V<sub>inff</sub>) debido a las fugas presentes en la red.

$$V_{\text{inff}} = 2 \text{ Hm}^3$$

-----

El volumen total infiltrado artificialmente será la suma de los dos volúmenes anteriores, o sea :

$$V_{\text{inf.art.}} = V_{\text{infr}} + V_{\text{inff}}$$

$$\text{Vinf.art} = 5.88 \text{ Hm}^3$$

---

Es conveniente aclarar que durante la realización del Censo de Aprovechamientos, muchos pozos no se encontraban en funcionamiento, o bien estaban conectados directamente a la red de distribución de agua potable o a la red de riego, lo cual obligó a que se estimaran los caudales de extracción, basándose en los diámetros de salida de las tuberías y "suponiendo" que la descarga se realiza a tubo lleno, con lo cual se puede estar sobreestimando los volúmenes de extracción.

El volumen medio anual total infiltrado será la suma de lo que se infiltra debido a la precipitación y el volumen de recarga artificial.

$$\text{Vinf} = \text{Vinfnat} + \text{Vinf.art}$$

$$\text{Vinf} = 5.53 \text{ Hm}^3 + 5.88 \text{ Hm}^3$$

$$\text{Vinf} = 11.41 \text{ Hm}^3$$

---

III.- G E O L O G I A

### III.1 Marco Geológico Regional

Como se menciona oportunamente, la zona estudiada se encuentra en el límite de dos provincias fisiográficas: La Sierra Madre Occidental (S.M.O.) y la Meseta Central (M.C.).

La primera se encuentra geológicamente caracterizada por dos grandes secuencias de rocas ígneas que se extienden prácticamente en la misma área formando una faja continua que bordea la parte occidental de México desde Arizona hasta su límite con la Faja Volcánica Mexicana, a partir de donde continúa por debajo, como lo demuestran evidencias de rocas de estas edades en el subsuelo, y afloramientos de rocas ácidas correlacionables en edad al sur de la faja antes mencionada. La secuencia inferior de la S.M.O. tiene edades entre los 100 hasta los 45 Ma, con abundantes rocas batolíticas y volcánicas principalmente de composición intermedia. La secuencia superior tiene edades entre 34 y 27 Ma, formada a partir de grandes calderas, está constituida principalmente por Ignimbritas, aunque se presentan también basaltos y escasas lavas intermedias.

Por su parte la Meseta Central, es una zona de valles alargados con algunas sierras bajas orientadas de NW a SE, formados por numerosos pilares y fosas tectónicas que presentan dicha orientación. Dichas fosas dislocaron los grandes afloramientos de rocas extrusivas ácidas, que se encuentran actualmente en la base de las fosas, como las de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Villa de Arriaga, Ojuelos y el Obraje. Estas, presentan desplazamientos promedio de 300-400 m entre las paredes de las fallas que las conforman, aunque evidencias geofísicas (Hernández et.al, 1990), indican que en algunas partes su desplazamiento total pudiera alcanzar hasta los 1200 m. A este sistema de fosas pertenece el Graben de Aguascalientes. La edad de este fallamiento distensivo se considera Post-Oligoceno.

En los pilares tectónicos de la Meseta Central, afloran rocas mesozoicas que se asocian a la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carrillo-Bravo, 1982), y que en el Estado de Aguascalientes se encuentran representadas por una secuencia de rocas cretácicas de origen marino, débilmente metamorfoseadas y plegadas que consisten en: calizas de cuenca de estratificación mediana con intercalaciones de pedernal (Formación Cuesta del Cura), cubiertas concordantemente por intercalaciones de calizas arcillosas de estratificación delgada con lutitas ligeramente metamorfoseadas que dan origen a las pizarras presentes en la región (Formación Indidura). Dentro de la secuencia también se han identificado limolitas. Sobreyaciendo al paquete anterior se encuentra una secuencia de lutitas y areniscas de grano fino de estratificación delgada (Formación Caracol).

Cubriendo a las rocas antes descritas, se encuentran las potentes secuencias de vulcanismo ácido correlacionables con el arco volcánico Oligo-Miocénico que formó la Sierra Madre Occidental. Al oriente de la Ciudad de Aguascalientes, aflora una sucesión de ignimbritas, tobas y piroclastos semiconsolidados, cuyo origen se asocia a una caldera que se encuentra al este de Tepezalá y que pudo originar la "ventana" de rocas cretácicas (calcáreas) que afloran en dicha región quizá como resultado de los colapsos y explosiones ocurridas durante los eventos del citado centro eruptivo. Dicha secuencia se encuentra interdigitada en su parte superior con sedimentos de origen aluvial, Asimismo, al sur del área de estudio, en el cerro Los Gallós, se identifica una caldera que se considera contemporánea a la de Tepezalá y pudo haber originado parte de las secuencias ignimbríticas identificadas en la porción sudoriental del área de estudio. La edad de las secuencias de tobas, (entre las que es posible distinguir una discordancia), puede asignarse al Mioceno, lo cual se apoya en el hecho de que estas se encuentran afectadas por la falla oriental del Graben de Aguascalientes.

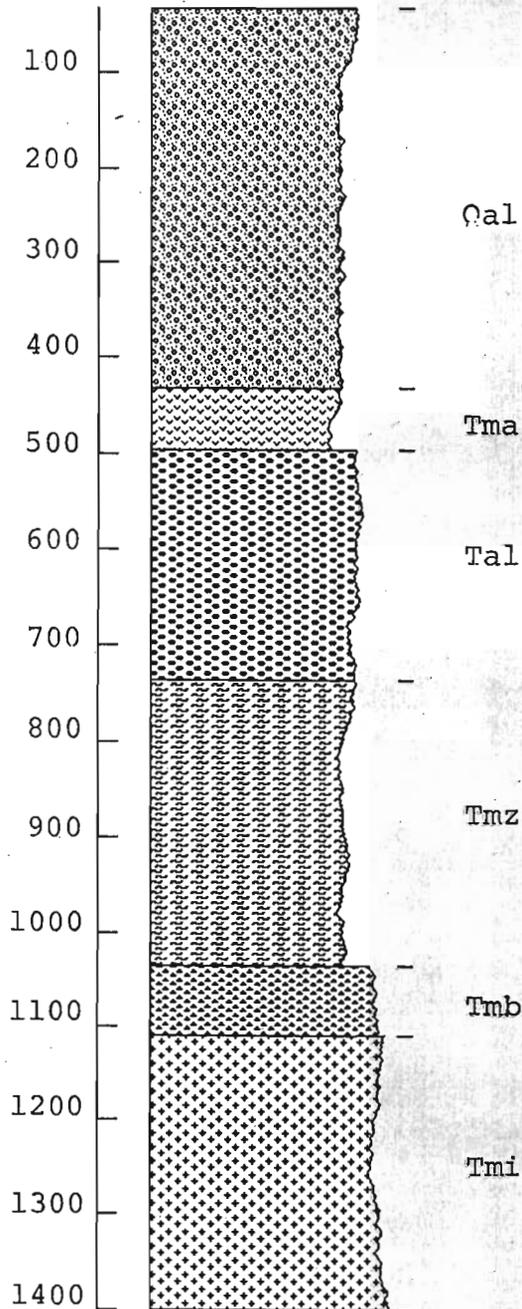
El relleno del Graben de Aguascalientes, lo constituyen aluviones cuyo depósito debió ocurrir durante el Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. No ha podido comprobarse que las fallas del graben aún se encuentren activas (Aranda-Gómez, 1989).

La columna estratigráfica regional se presenta en la figura III.2.1

STRATCOL from PETMAR Trilobites

Scale 1: 8000  
Ticks every 100 m

III.2 COLUMNA LOCAL



SIMBOLOGIA

- Qal = Depósitos aluviales Cuaternario.
- Tma = Toba Aguascalientes
- Tal = Material aluvial Terciario
- Tmz = Toba Zoyatal
- Tmb = Brecha Volcánica
- Tmi = Ignimbrita

### **III.2 ESTRATIGRAFIA**

Las rocas que afloran en el área de estudio son volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias. La distribución de estas rocas en el tiempo Geológico abarca del Oligoceno al Reciente. Se describen a continuación las unidades litoestratigráficas en orden cronológico ascendente. La distribución de los afloramientos de las unidades se presentan en el mapa geológico (Plano III.2.1).

#### **TERCIARIO**

##### **Secuencias Ignimbríticas del Terciario Medio (Tmi)**

Se les llama así a las secuencias ignimbríticas que afloran cerca del Balneario Ojo Caliente y junto a la Presa El Muerto, a las cuales Hernández Lascars (1981) denominó Riolita "Ojo Caliente" situando como localidad tipo al afloramiento alledaño al Balneario del mismo nombre.

En el afloramiento de Ojo Caliente, la ignimbrita está formando un montículo de 90 m de largo y 4.86 m de espesor medio. La roca es muy compacta y presenta en la parte inferior de su exposición una estructura fluidal y en la cima un aspecto masivo. En todo el afloramiento se aprecia un intenso fracturamiento. La muestra de mano, presenta un color rojo óxido al intemperismo y rosado al fresco, con abundantes cristales de cuarzo y feldespatos como minerales esenciales así como sericita y hematita como secundarios; todos ellos contenidos en una matriz vítrea. Asimismo se observan estructuras de desvitrificación esferulíticas y perlíticas.

En la zona de la Presa el Muerto, la ignimbrita se encuentra sobre el lecho del arroyo Xoconoxtle aflorando en un área de aproximadamente 1 Km de largo por 200 m de ancho. Esta roca presenta las mismas características estructurales y texturales que la de Ojo Caliente.

Los cortes litológicos de los pozos ubicados en las cercanías de la Ciudad de Aguascalientes, reportan la presencia de una brecha volcánica coronando a la ignimbrita. Esta misma relación se observa aflorando en los alrededores de la Presa el Muerto.

Por otra parte, algunos cortes litológicos de pozos en la zona de estudio, muestran que la secuencia ignimbrítica se encuentra subyaciendo a la Toba Zoyatal y en algunas zonas al aluvión del Terciario.

Las Ignimbritas son las rocas más antiguas que afloran en el área. Su contacto inferior no se logró observar en ninguna de las dos localidades citadas, sin embargo algunos pozos atraviesan 300 m de estas secuencias sin alcanzar su base por lo que se le infiere un espesor mayor de 300 m.

En la porción occidental del área, el pozo Morelos 8, atravesó 84 m de la ignimbrita y encontró suprayaciendo basaltos y aluviones, que pueden corresponder a la secuencia inferior del arco magmático que conforma la Sierra Madre Occidental.

Se les adjudica una edad premiocénica, por encontrarse subyaciendo a la Toba Zoyatal considerada del Mioceno. Lo anterior puede ser apoyado dada su localización y similitud con las rocas ignimbriticas extruídas en la Sierra Madre Occidental durante el Oligoceno (34 a 27 Ma; McDowell y Clabaugh, 1981).

#### **Brecha Volcánica del Terciario Medio (Tmb)**

Se denomina así a la formación que sobreyace a las secuencias ignimbriticas y en ocasiones subyace a la Toba Zoyatal, tendiendo a acuñarse bajo la misma. Aflora en ambos lados de la Presa El Muerto formando mesetas poco extensas.

Como sección de referencia se considera el afloramiento que se encuentra al Este del Ejido de Peñuelas en las proximidades de la Presa El Muerto, misma que se ubica en la porción meridional de la zona de estudio.

Macroscópicamente la roca presenta color gris opaco al intemperismo, y al fresco gris claro con tonalidades rosas. El tamaño de los fragmentos que constituyen la brecha varía desde bloques hasta lapilli, están unidos por una matriz vítrea color crema con algunos tintes negros. El grado de redondez del material va de anguloso a subanguloso.

El espesor total de la unidad en la sección de referencia es de 40 m. En los pozos Morelos 2 (63), Morelos 3 (64), Morelos 4 (56), Morelos 5 (58), y Cumbres (21), se perforaron espesores de 75, 74, 41, 52 y 22 m respectivamente.

La distribución de esta unidad es muy irregular, sobreyace a la Ignimbrita y se acuña bajo la Toba Zoyatal (Planos III.4.2 y III.4.3).

Considerando la posición estratigráfica de la unidad se le asigna una edad del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano.

### **Toba Zoyatal (Tmz)**

Hernández Lascars (1981), designó así a una secuencia de tobas con fracturas rellenas de material silíceo, que afloran en las Lomas Zoyatal ubicadas 4.5 Km al Este de la Ciudad de Aguascalientes.

En la zona de estudio esta unidad se encuentra aflorando principalmente en las paredes de los arroyos El Cedazo y Paso Hondo así como en la Presa El Cedazo.

Es una toba constituida por material piroclástico, cuyo tamaño es menor a 4 mm (ceniza), su color varía de café amarillento a crema pálido, en ocasiones presenta pequeñas cavernas y algunas veces llega a presentarse pseudoestratificada.

En muestra de mano la roca presenta color pardo al intemperismo y pardo claro al fresco. Su textura es terrosa, tiene poca densidad y solamente puede apreciarse el alto contenido de vidrio. Al microscopio presenta textura vitrofirica y el único mineral que pudo identificarse es el cuarzo pues las plagioclasas constituyen la matriz microfelsítica.

Sobre los arroyos El Cedazo, Paso Hondo y cerca de la Presa El Cedazo, la toba presenta un intenso fracturamiento, relleno por un gel silíceo muy compacto de color pardo a amarillento que muestra bandeamiento. En algunas ocasiones, dicho relleno se encuentra muy deleznable, con fractura concoidea.

El espesor total de la unidad no aflora, sin embargo es posible determinarlo con base en información de cortes litológicos de pozos, que alcanza hasta 296 m en el pozo Cumbres (21).

El pozo Morelos 5 (58) encuentra dentro de esta unidad e intercalada con la misma, un potente espesor de ceniza muy fina, que en los pozos cercanos no fué encontrada. El primero aparece sobre la brecha volcánica (Tmb), alcanzando los 78 m de espesor antes del depósito de 84 m de Zoyatal que nuevamente son interrumpidos por 186 m de ceniza hasta que 26 m de la toba coronan la secuencia.

Por otra parte, al oriente de la zona de estudio, a partir de las partes más altas de los lomeríos, aparece en la secuencia el Aluvión del Terciario (Tal) interdigitándose con la toba Zoyatal, generalmente sobreyaciéndola, pero también se presenta en medio o bajo la misma.

> CAANTINTFLA

Esta toba sobreyace discordantemente a la Ignimbrita y a la brecha volcánica, asimismo, subyace discordantemente a la Toba Aguascalientes (Hernández Lascares, 1981). El contacto inferior no aflora, sin embargo sus relaciones estratigráficas con la unidades infrayacentes se interpretaron a partir de la información de cortes litológicos de pozos. En cambio su contacto superior se observa en algunos arroyos al oriente de la Ciudad de Aguascalientes.

La edad asignada a esta unidad por su posición estratigráfica es del Oligoceno Tardío- Mioceno Temprano.

### **Aluvión del Terciario (Tal)**

Se denomina así a las secuencias de materiales sedimentarios que se encuentran aflorando en la porción sudoriental del área y que se distribuyen ampliamente en el subsuelo en la porción oriental.

Esta unidad aflora en las llanuras al oriente del área, pero sus características fueron definidas a partir de la información de los cortes litológicos de pozos.

Consiste en secuencias de sedimentos que varían en tamaño desde limos hasta gravas, semiconsolidados y no consolidados, que en algunas partes se encuentran parcialmente cementados con carbonatos y óxidos. Los cortes litológicos de los pozos perforados en la porción más oriental, dentro de las zonas cubiertas por material residual, reportan esta unidad a partir de los 10 m hasta una profundidad promedio de 250 m de profundidad en promedio y en las porción oriental de la zona cartografiada como Tma (Toba Aguascalientes) se encuentra bajo 4 m de esta última.

El espesor mínimo se encontró fué de 6 m (pozo IV Centenario), mientras que el máximo fue de 240 m (pozo PAB-26).

Hacia el oriente, fuera de la zona de estudio, esta unidad cubre discordantemente a las secuencias ignimbríticas. En la zona de las mesetas en la parte oriental del área se interdigita con la Toba zoyatal. A su vez, en algunos sitios, este aluvión se encuentra cubierto por material residual y por pequeños espesores de la Toba Aguascalientes.

Por su posición estratigráfica se le asigna una edad del Mioceno Temprano.

### **Toba Aguascalientes (Tma)**

Hernández Lascars (1981), dió este nombre a una secuencia de tobas de color amarillento que varía a café cremoso y café rojizo con pseudoestratificación gruesa semiconsolidada a inconsolidada, interestratificada con materiales aluviales de tamaño arena y grava también semiconsolidados.

En la zona de estudio esta secuencia se encuentra aflorando en casi toda el área. Los mejores afloramientos se localizan principalmente en las paredes de los arroyos El Cedazo y Paso Hondo.

Su base está representada por una toba de lapilli de aspecto masivo y deleznable de composición riolítica, cuyo color al intemperismo es café rojizo y café cremoso al fresco.

Dentro de esta secuencia se encuentran lentes de ceniza blanca con espesores variables de 30 cm a 4 m. Se considera que esta ceniza por su forma de depósito, se encuentra rellenando depresiones.

En algunas partes este material se encuentra interdigitado con material aluvial compuesto por gravas y arenas (de gruesas a finas) de composición riolítica, el cual presenta gradación normal en algunas porciones y estratificación con gradación inversa en otras. Los depósitos aluviales corresponden generalmente a paleocanales. Dichas estructuras fueron claramente observadas en los arroyos Paso Hondo y El Cedazo.

Por último en la cima de esta unidad litoestratigráfica, se encuentra nuevamente la toba masiva de color café cremoso con intercalaciones de material aluvial. Esta última secuencia se puede observar en los cortes de la carretera No 70 rumbo a San Luis Potosí aproximadamente a 10 Km de la Ciudad de Aguascalientes.

Una arenisca tobácea calcárea fué observada en el arroyo El Cedazo aproximadamente 2.5 Km aguas arriba de la presa del mismo nombre, y en los lomeríos que se encuentran al norte del Fraccionamiento Ojo Caliente. Dentro de los minerales esenciales que contiene, están el cuarzo y plagioclasas, como secundarios la hematita y sericita, y como accesorios la biotita y hornblenda, todos ellos constituyen menos del 50% de la roca, mientras que el contenido de calcita como cementante es mayor al 50%. La matriz parece contener flotando a todos los cristales además de fragmentos subredondeados de vidrio, todos en contacto limpio sin corrosión en los bordes. En el campo se infirió que sobreyace a la Toba Zoyatal pero sus relaciones

estratigráficas en realidad no son del todo claras, debido a que solo se encontró en dos pequeños afloramientos y no se le pudo seguir continuidad horizontal.

El espesor aflorante máximo de la unidad se estima en 120 m. En los cortes litológicos de pozos, el espesor máximo es de 64 m (Pozo Morelos 8).

En cuanto a sus relaciones estratigráficas, la Toba Aguascalientes descansa discordantemente sobre la toba Zoyatal, mientras que al sur cubre a la brecha volcánica del Terciario medio. Subyace a depósitos sedimentarios del Cuaternario. Los fósiles del Mioceno Medio encontrados en la región, es más factible que provengan del material aluvial interestratificado con esta unidad, que de la Toba Zoyatal como se ha considerado, pues la fauna del Pleistoceno, según Mooser (1959), fué colectada en paleosuelos al ser erosionados por las avenidas de la época de lluvias. Otro argumento para apoyar la edad de esta unidad, es que se encuentra afectada por la Falla oriental del Graben de Aguascalientes, misma que se considera del Terciario Medio.

#### **CUATERNARIO**

Las unidades Cuaternarias están constituidas por depósitos aluviales y material residual.

En los recorridos de campo también se pudo apreciar que sobre estos materiales se encuentran costras de caliche en espesores de 15-35 cm, así mismo se observaron grandes espesores de suelo.

#### **Aluvión del Cuaternario (Qal)**

En la porción occidental del área se encuentra el Graben de Aguascalientes el cual está relleno por material aluvial del Terciario y del Cuaternario. Este último forma gran parte del acuífero granular que se explota en el citado graben. Ninguno de los pozos perforados dentro del Graben alcanzó las secuencias volcánicas, por lo que se considera que el aluvión tiene un espesor mínimo de 400 m. Aunque es conveniente mencionar que se desconoce si este espesor corresponde solo al aluvión del Cuaternario.

De la falla oriental del Graben hacia el este, los aluviones ocupan principalmente los cauces de los arroyos y las depresiones de la zona. Estos consisten de grava, arena y limo, con clastos redondeados a subredondeados, sus espesores varían de acuerdo al tipo de depósito, ya sea que se encuentren rellenando paleodepresiones o solo cubriendo el terreno.

Estos depósitos no están consolidados y sobreyacen a las tobas, lo cual se puede apreciar claramente en los cauces de los arroyos El Cedazo y Paso Hondo principalmente.

Por encontrarse sobreyaciendo a rocas terciarias se considera que este material es del Reciente.

### **Sedimentos Residuales**

Estos se encuentran en las partes altas de los lomeríos y son el producto de la alteración de las Tobas.

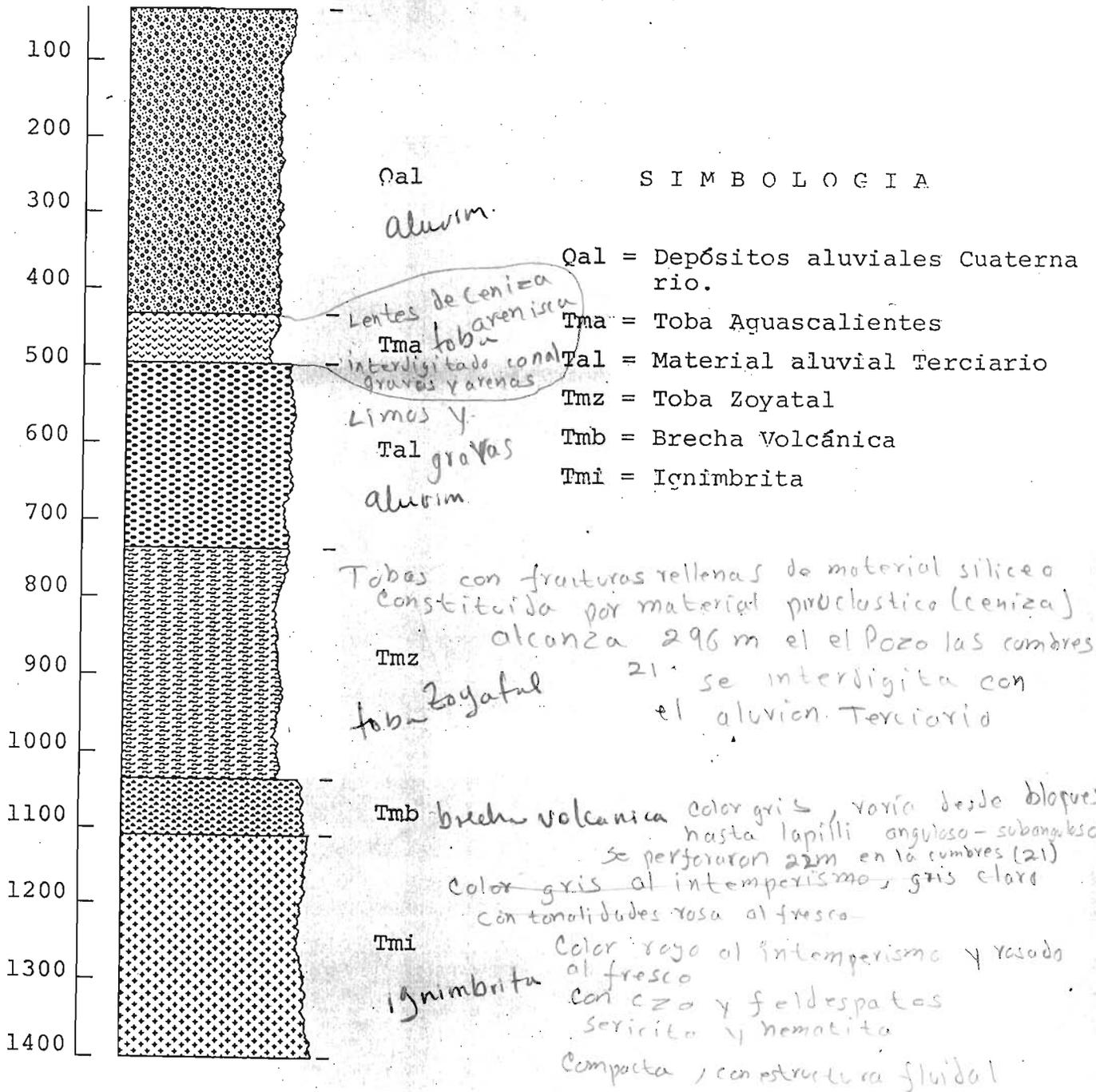
Son materiales de color gris a café oscuro, con espesores de 20 cm a 3 m. Sus afloramientos se observan en los cortes de los arroyos Paso Hondo y Calvillito principalmente.

La columna Estratigráfica local se indica en la figura III.2

STRATCOL from PETMAR Trilobites

Scale 1: 8000  
 Ticks every 100 m

III.2 COLUMNA LOCAL



### **III.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL**

#### **Análisis de fracturas**

Las fracturas son los rasgos estructurales más comunes expuestos en la superficie terrestre y se encuentran en todos los tipos de rocas; aunque en ocasiones penetran considerable distancia dentro de la corteza superior, su frecuencia tiende a disminuir con la profundidad. Las fracturas se encuentran en todos los tipos de rocas.

Una fractura se define como una discontinuidad de origen geológico a través de la cual no ha ocurrido desplazamiento apreciable (Ramsay y Hubert, 1987). Las fracturas se encuentran formando arreglos generalmente paralelos o subparalelos. Cuando se presentan orientaciones cruzadas, el patrón geométrico resultante se conoce como un sistema de fracturamiento. La disposición cruzada de las fracturas que forman un sistema, puede haber sido formada al mismo tiempo pero la contemporaneidad no es un requisito indispensable.

Las fracturas han sido clasificadas en ocasiones como fracturas de alguno de los dos siguientes tipos:

- a) producidas por esfuerzos distensivos
- b) producidas por esfuerzos de cizalla

Esta es una subdivisión basada en la observación de las relaciones angulares entre las fracturas así como en la disposición espacial de los sistemas que forman las mismas y relacionando ambos factores con los tipos de esfuerzos verificados en la zona generalmente a través de fallas. Pero debido a que no ha sido posible distinguir algún desplazamiento normal o paralelo en las paredes de las fracturas que se han observado, esta clasificación no ha podido ser comprobada. Otros geólogos piensan que las fracturas solo pueden ser formadas por desplazamiento distensivo.

Las fracturas individuales son pequeñas en general (del orden de 1 a 10 metros), mientras que las fracturas maestras son aquellas que sobrepasan los 10 m de longitud, y en ocasiones llegan a medir hasta centenares de metros, lo cual las hace fácilmente distinguibles desde fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Un estudio Fotogeológico es entonces, considerado el método más conveniente para evaluar la orientación de los sistemas de fracturas, ya que las fracturas maestras influyen considerablemente en la geomorfología. La mayor parte de los lineamientos sobresalientes observados en las fotografías aéreas, son fracturas maestras, más que fallas. En ocasiones las

fracturas se encuentran relacionadas geoméricamente con fallas en algunos terrenos, en otros no guardan ninguna relación entre sí.

Las fracturas son rasgos muy importantes en el control de los procesos hidrogeológicos, ya que muchos acuíferos bien conocidos deben sus propiedades a sistemas de fracturas bien desarrollados.

Tanto para fines estructurales como para fines hidrogeológicos, las fracturas que forman arreglos persistentes a escala regional son los que representan mayor interés. La regularidad de dichos sistemas de fracturas implica que debieron haber sido formadas bajo estados de esfuerzo, constantes tanto en orientación como en magnitud (esfuerzos principales). Aunque se ha sugerido que dichos patrones regulares podrían estar relacionados con una "fatiga global" de las rocas de la corteza superior (una especie de basculamiento), la mayor parte de los geólogos son de la opinión de que dichos sistemas son el resultado de esfuerzos tectónicos.

Todo lo anterior demuestra el hecho de que las fracturas son los rasgos estructurales más difíciles de interpretar pues aún no ha sido bien definida su relación con los esfuerzos que las producen y la deformación que estas le provocan a los macizos rocosos, aunque ha sido probado que la deformación producida por las fracturas es muy pequeña, probablemente mucho menor al uno por ciento (Ramsay y Hubert, 1987). Dichas deformaciones detectadas a partir de los sistemas de fracturas son, ya sea las inducidas por las últimas fases de la actividad orogénica, o las provocadas por la liberación de esfuerzos orogénicos elásticos almacenados durante los períodos de levantamiento tardío, quizás millones de años después de que el tectonismo principal ha finalizado. En regiones cratónicas podrían deberse a esfuerzos regionales originados por combamientos o subsidencia de cuencas, aunque también podrían ser inducidas por el basamento rocoso fracturado.

#### **Método de análisis de fracturas y lineamientos.**

Debido a que la mayor parte de las estructuras que afloran en la zona en estudio son fracturas y a que las unidades que se explotan en Aguascalientes son las tobas y las ignimbritas, se consideró conveniente hacer un análisis de la ocurrencia de fracturas y fallas principales, mismas que en algunos casos pueden actuar como conductos para el flujo subterráneo, causando que las zonas propias para la explotación del agua subterránea, se encuentren controladas por las estructuras. El interés principal de efectuar este análisis, es el de relacionar lo observado en los reconocimientos de campo, con la ocurrencia de fracturas maestras en la zona y asociarlo con la litología.

El método que se empleó para hacer el análisis estructural es el siguiente:

1) Interpretación de imágenes de satélite LANDSAT escala 1:1'000 000 y ampliaciones escala 1:250 000.

2) Fotointerpretación de 58 fotografías aéreas verticales correspondientes a las líneas de vuelo L-4, L-5 y L-6 de la Ciudad de Aguascalientes, tomadas en 1979 a escala 1:10 000.

3) Análisis de fracturas levantadas en los recorridos de campo.

Con la interpretación realizada en las imágenes se elaboró un mapa de lineamientos escala 1:35 000.

Una vez efectuado el inventario de estructuras, se aplicaron los criterios adecuados al tipo de estructuras presentes en la zona. De este modo se elaboraron rosetas de fracturas para cada grupo de datos elegidos con los criterios que se señalan más adelante.

Para los datos medidos en los afloramientos durante los reconocimientos de campo, se hicieron rosetas de fracturas y se graficaron los datos en falsilla de Wulff (de igual ángulo), con el fin de distinguir las direcciones dominantes. En este caso se agruparon los afloramientos de roca medidos y se hicieron análisis puntuales, pues se parte de la idea de que cada macizo rocoso tiende a comportarse de manera distinta, dependiendo de su litología y los esfuerzos a que haya estado sometido.

Para las fracturas interpretadas mediante fotografías aéreas, también se hicieron rosetas de fracturas y proyecciones de igual ángulo.

Tanto para los datos tomados en los afloramientos, como para los interpretados mediante imágenes y fotografías, se hicieron análisis estadísticos de concentraciones del total de los resultados.

Considerando los datos de los tres tipos de análisis se integraron los datos en una falsilla en donde aparecen todos los datos considerados.

El tipo de análisis descrito arriba, pretende dos objetivos principales:

1) Conocer las orientaciones principales de las estructuras de la zona, para poder asociarlas al comportamiento del flujo de aguas subterráneas y;

2) Tratar de distinguir las fracturas maestras que pueden aportar evidencias sobre la dirección de los esfuerzos principales en la zona, para relacionarlos con la evolución geológica regional.

### **Discusión de Resultados**

A continuación se hace una breve discusión sobre los resultados obtenidos en el análisis estructural.

### **Escala Regional**

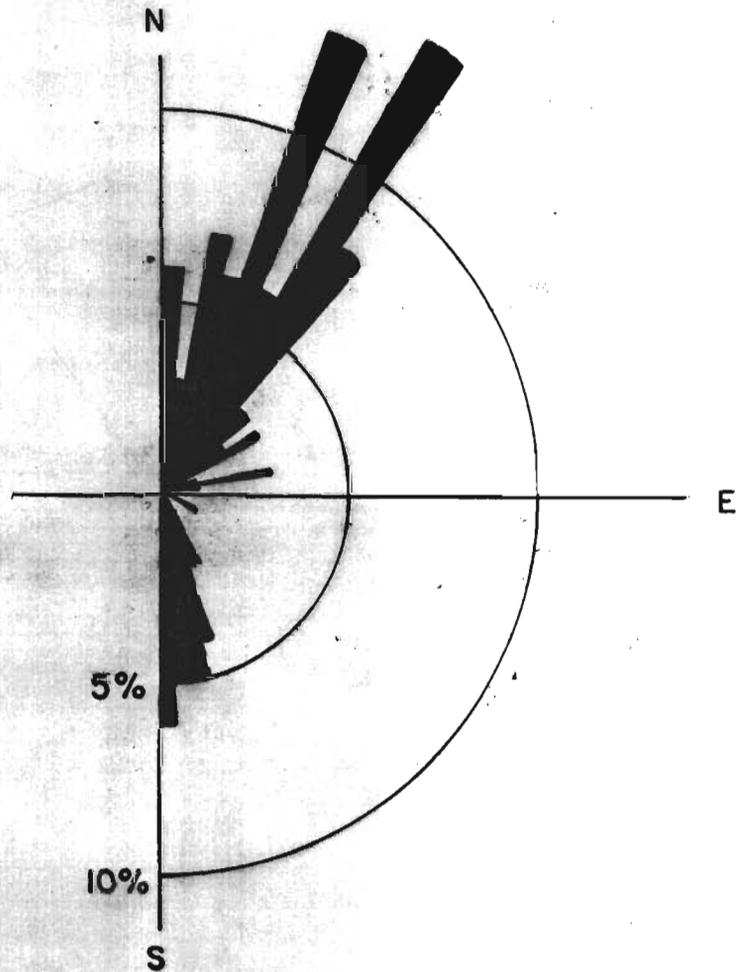
De la interpretación de lineamientos efectuada sobre una imagen LANDSAT escala 1: 1'000 000 de una imagen LANDSAT, se observa que el área seleccionada, la cual se muestra en la figura III.3.1.a, cubre un área cuya parte central (Graben de Aguascalientes) corresponde al límite fisiográfico entre la Sierra Madre Occidental y la Meseta Central. Por tal motivo, se creyó conveniente efectuar un análisis por separado de las partes pertenecientes a una y otra Provincia.

En la porción occidental de la imagen, se aprecian tres direcciones principales de lineamientos, las cuales se presentan en la roseta de fracturas (figura III.3.2). La más importante de éstas posee rumbo N30E, la segunda N20E y la tercera N-S. En la Falsilla de Wulff (figura III.3.3), se aprecian las mismas direcciones que en este caso están indicadas por los círculos máximos promedio obtenidos de las zonas de mayor concentración de polos. La primera y la segunda dirección corresponden a los rumbos de las fallas del graben de Aguascalientes (mismo que pertenece a una de una serie de fosas correlacionables entre sí genética y cronológicamente así como por su orientación y que constituyen las estructuras más sobresalientes en la Meseta Central). Estas evidencias y la aparente ausencia de lineamientos en otras direcciones, indican que es muy probable que los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se orienten como se muestra en la figura III.3.3.

En la porción oriental de la imagen se observan cuatro rumbos dominantes, que se encuentran representados tanto en la roseta de fracturas, como en la proyección de igual ángulo (figuras III.3.4 y III.3.5, respectivamente). Los rumbos principales de los lineamientos son casi los mismos con excepción de dos orientaciones secundarias. En esta parte de la imagen es más difícil distinguir los campos de esfuerzo principales, ya que aparecen otros rumbos dominantes, sin embargo el campo de esfuerzos principales definido en la parte occidental, sigue siendo el más importante (figura III.3.6).

Para fines hidrogeológicos, la ocurrencia de lineamientos y fallas en las direcciones principales obtenidas en el análisis regional, que cubren principalmente zonas de afloramientos extensos de ignimbritas al noroeste de Aguascalientes, podría indicar el rumbo principal de fracturamiento que se encuentra afectando también a las ignimbritas que se explotan en el subsuelo de la porción oriental de la Ciudad de Aguascalientes, mismo que debe estar influyendo la circulación del agua subterránea.

110 DATOS  
5° I.C

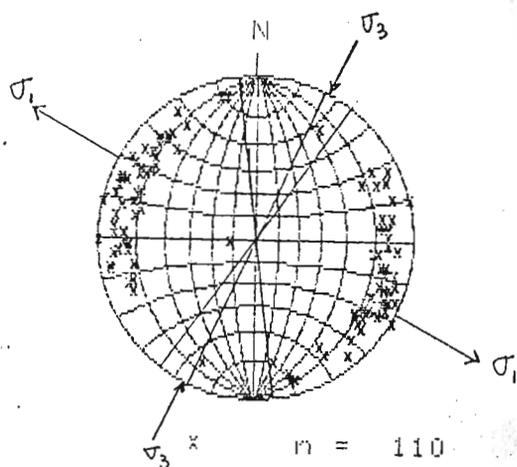


Lineamientos al occidente del Graben  
de Aguascalientes. Dentro de la  
Sierra Madre Occidental.

Figura. III: 3.2

Lineamientos al W del Graben Aqs.

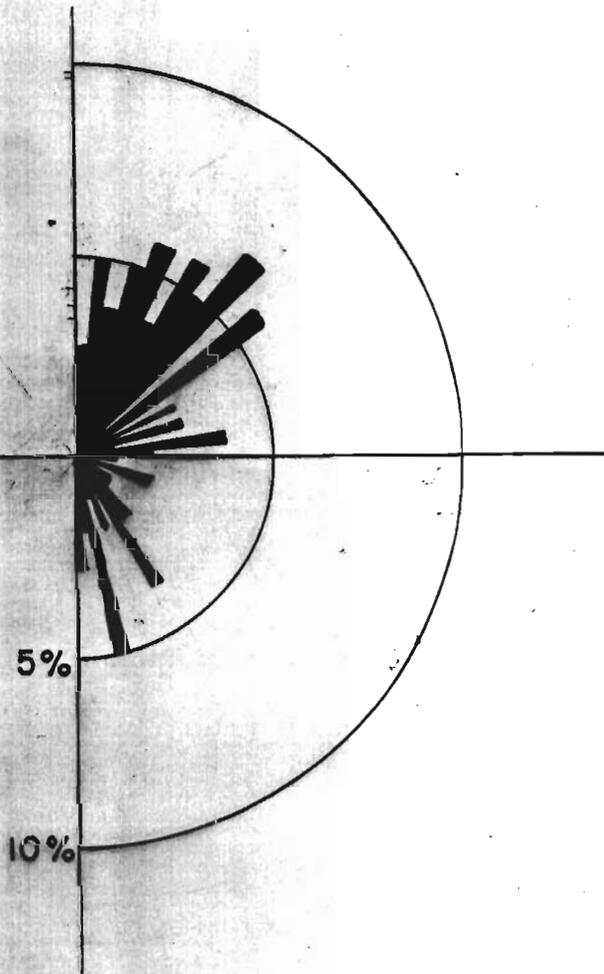
n = 110



Wulff net, Lower hemisphere projection

Figuro.III. 5.3

92 DATOS  
5° I.C.

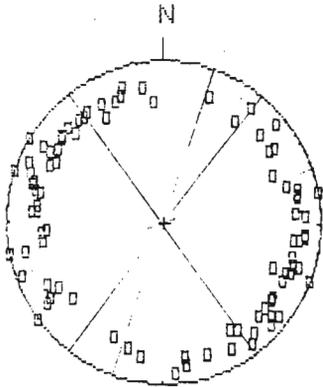


Lineamientos al oriente del Graben  
de Aguascalientes. Dentro de la  
Meseta Central

Figura.III: 3.4

Lineamientos al E del Graben Ags.

n = 92



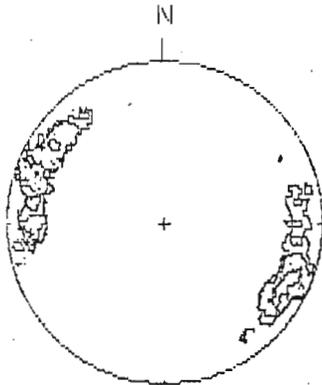
n = 92

Wulff net, Lower hemisphere projection

Figura.III.3.5

Concentraciones escala regional

n = 202



□ n = 92  
◇ n = 110

Wulff net, Lower hemisphere projection  
Contours at 3.00 % 5.00 % 7.00 %

Figura. III. 3.6

### **Escala Local**

De las fotografías aéreas se interpretaron las fracturas y fallas que cubren la región central del mapa estructural (Plano III.3.7), el resto del área fue cubierta empleando la imagen LANDSAT a escala 1:250,000 en falso color, misma que se muestra en la figura III.3.1.b. De dicha imagen, se interpretaron todas las fracturas que atraviesan el área, manifestándose gran parte de ellas en la red de drenaje.

Como puede verse en el mapa estructural (figura III.3.7), a la altura de la Ciudad de Aguascalientes, se presenta una zona de escasez de fracturas, la cual se tomó como límite para hacer una división arbitraria en dos partes que se denominan en lo sucesivo: "porción NE de Aguascalientes" y "Porción SE de Aguascalientes".

Del análisis de las estructuras reconocidas y vaciadas en el mapa estructural se concluye lo siguiente:

1) Se identificaron dos fallas; la primera es la traza de la falla oriental del Graben de Aguascalientes, la cual se indica con línea discontinua; la segunda es una falla con dirección NE-SW que se encuentra al NE de la presa Los Gringos.

2) El análisis de fracturas y fallas de la porción NE de aguascalientes, indica lo siguiente (figura III.3.7):

Los cuatro rumbos principales de fracturas maestras son en orden de importancia: S25E; S40E; N20E y N70E. Como puede observarse, el tercero de éstos rumbos es el mismo que se identificó como principal a escala regional.

El campo de esfuerzos principales en esta zona no es muy claro, pero si se toman como base las direcciones dominantes, podría interpretarse como se muestra en la proyección de igual ángulo mostrada en la figura III.3.7.

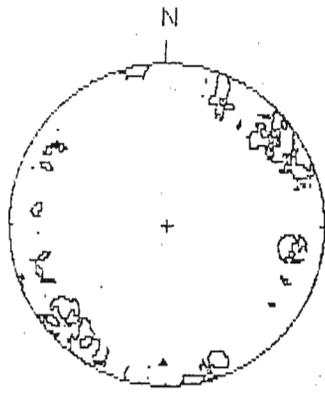
3) Las fracturas maestras que se ubican al SE de Aguascalientes presentan tres rumbos principales que en orden de importancia son: S70E, N40W y S30E. Es posible relacionar los dos últimos con dos direcciones obtenidas en la porción NE.

Los esfuerzos que se infieren de las direcciones principales se muestran en la figura III.3.7.

En la figura III.3.8 se resumen las concentraciones de polos de fracturas y fallas a escala 1:10 000, indicando los círculos máximos promedio que indican las direcciones principales de fracturamiento.

Concentraciones Escala 1:10 000

n = 212



□ n = 106  
◇ n = 106

Wulff net, Lower hemisphere projection  
Contours at 3.00 % 5.00 % 7.00 %

Figura.III .3.8

### **Escala de Afloramiento**

En nueve recorridos se midieron datos a lo largo de arroyos y de afloramientos representativos de algunas unidades. Las rosetas y proyecciones correspondientes a cada punto se indican en los puntos 1 a 8 del mapa III.3.7.

El punto 1, corresponde a la localidad de Ojo Caliente, en donde debido a la escasez de datos, es difícil hacer la determinación del rumbo dominante.

El punto 2 Corresponde a la localidad de la Zona Militar en donde son dominantes los rumbos N-S, N20E y N40E.

El sitio 3, es la representación de datos medidos en el arroyo Don Pascual, cuyas direcciones dominantes son: S20E, S70E y S85E, mismos que se ven claramente reflejados tanto en la roseta de fracturas como en la proyección de igual ángulo.

El sitio 5, son los datos tomados en el arroyo Paso Hondo, donde se observa un rumbo dominante (S05E) y cinco rumbos secundarios de igual importancia: N30E, N85E, S75E, S35E y S45E.

En el punto 6 que corresponde a los lineamientos de la Ciudad de Aguascalientes, los datos se concentran en dos extremos de la proyección de Wulff, pero es poco representativo dado el número de datos registrados.

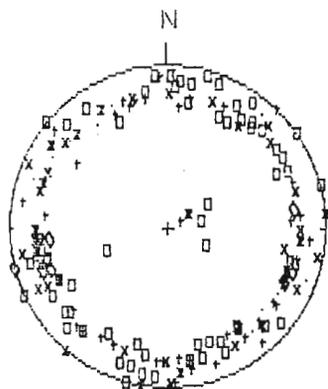
El punto 7, corresponde al Arroyo El Cedazo, que presenta una dirección dominante E-W y una secundaria N80E.

Por último, el sitio 8, que corresponde a la localidad Puertecito, presenta dos concentraciones simétricas de polos de fracturas en la proyección de igual ángulo, que nos están indicando un rumbo dominante N40E.

En la proyección de todos los datos de los afloramientos, (figuras III.3.9 y III.3.10), se indican 5 direcciones principales, dentro de las cuales la más importante desde el punto de vista estadístico, es la que presenta rumbo N15W, siguiéndole en importancia otras tres con casi la misma concentración de polos, cuyos rumbos son: N50E, N85W, S50E, y la quinta con menor concentración con dirección N20E. De los rumbos mencionados, el primero corresponde a la orientación principal de las fracturas medidas en la Zona militar-Fraccionamiento Ojo Caliente, en el caminamiento Arroyo Paso Hondo y en el afloramiento de Ojo Caliente. El segundo, que en el análisis estadístico de los datos de cada afloramiento en particular no es de los más importantes, se presenta como el segundo más importante en la proyección de todos los datos a escala de afloramiento, lo cual indica que se distribuye regionalmente de manera constante. El tercero (N85W), es rumbo dominante en: el Arroyo Don Pascual, Arroyo Paso Hondo, en el Arroyo El Cedazo y

Conjunto de datos de Afloramientos

n = 175



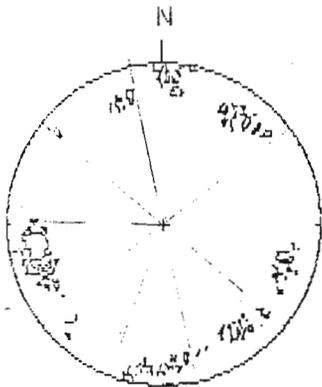
+	n =	42
x	n =	28
o	n =	74
*	n =	15
◇	n =	7
.	n =	9

Wulff net, Lower hemisphere projection

Figura.III.3.9

# Concentraciones escala afloramiento

n = 175



+	n =	42
x	n =	28
o	n =	74
*	n =	15
◇	n =	7
.	n =	9

Wulff net, Lower hemisphere projection.  
Contours at 3.00 % 4.00 % 5.00 %

Figura.III.3.10

la Presa El Cedazo. El cuarto es importante en el Arroyo Don Pascual. Por último la quinta orientación se presenta en el Arroyo Paso Hondo y Zona militar- Fraccionamiento Ojo Caliente.

El conjunto de todos los datos estructurales se proyectó en falsilla de igual ángulo y se hizo un análisis estadístico de las máximas concentraciones de polos, obteniéndose los resultados que se muestran en las figuras III.3.11 y III.3.12 respectivamente, de donde se desprende que las orientaciones dominantes son las mostradas en dichas figuras. Sin embargo, es conveniente tomar en cuenta que el número de datos en cada escala difiere y esto puede estar influyendo las orientaciones ahí representadas.

En cuanto a los trabajos sobre Geología Estructural efectuados en el área por otros autores, los más importantes son el de Martínez Ruiz (1884), el de Aranda-Gómez, J.J. y J.M. (1985), y de Aranda-Gómez, et.al., (1989). De dichos trabajos se desprenden las siguientes conclusiones:

1.-No está claro el, origen de las grietas que se han formado en la Ciudad de Aguascalientes.

3.-Con las evidencias actuales no ha sido posible determinar si las fallas del Graben de Aguascalientes aún se encuentran activas.

2.-En la altiplanicie volcánica del Terciario Medio "se observan dos juegos de alineamientos con rumbos NNE y WNW", lo anterior está apoyado en resultados de la región minera de Guanajuato y en otras partes de la Meseta Central.

3.- En el área de la Tomatina-Cerro el Cabrito, que se encuentra al poniente de la Ciudad de Aguascalientes, se distinguen dos juegos de fallas: uno N40E y otro WNW, regionalmente se identificó un rumbo dominante N80W.

Como puede verse de los resultados de este estudio, algunas de las ideas anteriores se ven apoyadas por los resultados obtenidos, mientras otras quedan aún como preguntas, además de que se propone un modelo sobre la estructura geológica de la región (ver capítulo III.5).

Conjunto de datos

n = 620



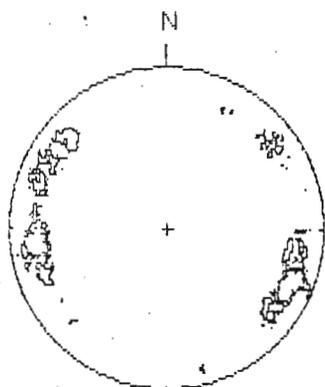
+	n = 215
□	n = 202
◇	n = 203

Wulff net, Lower hemisphere projection

Figura.III.3.II

Concentraciones del conjunto de dat

n = 620



+	n = 215
o	n = 202
◇	n = 203

Wulff net, Lower hemisphere projection  
Contours at 3.00 % 4.00 %

Figura.III. 3.12

### III.4 GEOLOGIA DEL SUBSUELO

#### III.4.1 INTRODUCCION

La Geología posee algunas ramas que se enfocan a la resolución de problemas específicos que no se incluyen dentro del contexto general de esta ciencia. Una de estas ramas es la Geología del Subsuelo, cuyo objetivo principal en el presente estudio, es el proporcionar las bases para la elaboración de un modelo de la geometría de las unidades litoestratigráficas en el subsuelo y aportar elementos para construir, junto con la información proporcionada por la geofísica, mapas de isopacas y de la cima de la unidad más profunda de interés hidrogeológico.

Para cumplir con dicho objetivo, se recopiló información de un total de 68 cortes litológicos de pozos de los cuales, 38 fueron proporcionados por S.O.P., 27 por C.N.A. y 3 por C.A.P.A.; posteriormente se revisó esta información y únicamente se utilizaron 45 que se encuentran dentro de la zona de estudio o en sus cercanías. De éstos, 33 pozos se ubican al oriente de la Ciudad de Aguascalientes, dentro de la zona comprendida entre los poblados de San Antonio I de los Pedroza y Los Durón. Los 12 restantes se encuentran dentro del Valle de Aguascalientes.

La profundidad que alcanzan los pozos varía de 200 a 450 m con excepción del pozo PPBA-5 (102)<sup>1</sup> que tiene una profundidad de 600 m. Las unidades litoestratigráficas que atraviesan son: la Toba Aguascalientes (Tma), la Toba Zoyatal (Tmz), la Brecha Volcánica del Terciario Medio (Tmb), Aluvión del Terciario (Tal) y las secuencias Ignimbríticas del Terciario Medio (Tmi). Cabe mencionar que tales unidades, se interpretaron a partir de la correlación de las unidades observadas en campo con la litología descrita en la perforación de cada pozo, tomando las descripciones con criterio y considerando que los pozos han sido perforados por diferentes compañías, lo cual implica que personas con distinta formación y experiencia, describan las muestras de canal, utilizando diversos criterios en la descripción. Las descripciones dudosas se revisaron comparando el registro eléctrico del pozo con el corte litológico.

De los 45 cortes con que se dispone, solo se utilizaron 30 para la elaboración de 8 secciones de correlación geológica del subsuelo con escala horizontal 1:35,000 y escala vertical 1:10,000. La localización de las secciones se muestra en el mapa III.2.1. Es importante que al observar la información de dichas secciones, sea tomada en cuenta la deformación resultante de los cambios de dirección debidos a que las líneas de sección siguen la posición exacta de los pozos, asimismo, es conveniente ver la localización de cada una en planta, para evitar

errores de apreciación, ya que no se trata de secciones geológicas sensu-stricto. Dichas secciones se emplearon para conocer la distribución espacial de las unidades litoestratigráficas en el subsuelo del área de estudio.

#### III.4.2 DISTRIBUCION DE LAS UNIDADES EN EL SUBSUELO

Como se menciona antes, se uniformizó la información empleando los siguientes criterios por unidad:

##### Aluvi6n (Qal)

Se consider6 como aluvi6n cuaternario, todo el material granular que se describe como: "gravas", "gravas-arenas", "arenas de gruesas a finas" de los pozos ubicados en el Valle de Aguascalientes.

##### Toba Aguascalientes (Tmã)

Para definir esta unidad en el subsuelo, se consider6 la descripci6n de la "toba h6brida" (toba de color caf6 claro con intercalaciones de material aluvial), las "arenas h6bridas" y las "gravas y arenas".

##### Toba Zoyatal (Tmz)

Para esta unidad se consideraron las siguientes descripciones: "Toba vítrea caf6 pardo", "toba arenosa", "arenas tobaceas" y "toba arcillosa gris-crema".

##### Brecha Volcánica (Tmb)

Se considera que se refieren a esta unidad las siguientes descripciones:

"Conglomerado de origen riolítico alternado con arcilla", "toba riolítica alterada con intercalaciones de clastos de ignimbrita y toba arenosa", "fragmentos de riolita con toba arenosa y toba areno-arcillosa con volcanoclastos de riolita ignimbritica".

##### Aluvi6n del Terciario (Tal)

Se determin6 como aluvi6n del Terciario al "material arenoso con gravas y gravillas", "conglomerado", "grava y arena con arcilla", "arcilla y gravilla", "gravas gruesas", "gravas y arenas".

##### Ignimbrita (Tmi)

Para esta unidad de roca se tom6 la descripci6n de la "ignimbrita", el "vitr6firo" y la "riolita".

Los resultados de la interpretaci6n de los pozos, se trasladaron a un programa de c6mputo que elabora columnas litol6gicas y

estratigráficas a escala. Dichas columnas se ubicaron en un mapa que se denomina: "Distribución de las unidades litoestratigráficas en los pozos" (mapa III.4.1). En dicho mapa pueden verse de manera muy clara las variaciones en espesores, profundidades y relaciones estratigráficas entre las unidades litoestratigráficas en el subsuelo. Este último, junto con el mapa geológico (mapa III.2.1) y las secciones (planos III.4.2 y III.4.3) completan la representación tridimensional del área.

A continuación se hace la descripción de cada una de las secciones.

#### SECCION I-I'

Inicia en el poblado de La Huerta (Las Trojes) y se extiende hasta el poblado San Antonio I de los Pedroza (ver plano III.2.1), tiene una orientación NE-SW y la conforman 9 pozos que a continuación se mencionan: Pozo 82 (74), Héroes Mexicanos 2 (61), Morelos 1 (62), Morelos 2 (63), Morelos 3 (64), Morelos 5 (58), SAA-19 (55), Conejal (27) y SAA-21 (10), de estos los tres primeros se encuentran dentro del Valle de Aguascalientes y los otros 5 están localizados en la zona de lomeríos.

Como se puede observar en la sección, los pozos 82 (74), Héroes Mexicanos 2 (61) y Morelos 1 (62) se encuentran cortando material aluvial. Los pozos Morelos 2 (63), Morelos 3 (64), Morelos 5 (58), SAA-19 (55), Conejal (27) y SAA-21 (10) se encuentran cortando la Toba Aguascalientes y la Toba Zoyatal cuyos espesores varían de 10 a 60 m y de 200 a 300 m respectivamente.

La diferencia de litología entre los pozos Morelos 1 (62) y Morelos 2 (63) indica la presencia de una falla.

En los pozos Morelos 2 (63), Morelos 3 (64) y Morelos 5 (58) se encuentra la Brecha Volcánica a profundidades de 350, 296 y 324 m respectivamente, cortando espesores de 40 a 75 m. Subyaciendo a esta unidad se encuentra la Ignimbrita localizada a los 425, 415 y 242 m de profundidad en los pozos Morelos 2 (63), Morelos 5 (58) y SAA-19 (55) respectivamente, tales pozos cortan espesores de 26 a 35 m. Sin alcanzar el límite inferior de esta unidad.

En el pozo Morelos 5 (58) se encuentran lentes de ceniza con espesores de 20 a 186 m. El material aluvial del Terciario aparece en los pozos SAA 21(10) y Conejal (27).

La principal estructura que se observa en esta sección es la falla que forma el flanco oriental del graben de Aguascalientes. También hay una serie de fracturas que se encuentran en la Toba Aguascalientes y en la Toba Zoyatal, de las que se desconoce su profundidad.

#### SECCION II-II'

M2 125  
126 m 3  
130 m 5  
SSA-19  
CONEJAL  
SSA-21  
Toba Zoyatal  
200-300 m  
espesor.  
Togs.  
10-60  
espesor.

Esta sección tiene una dirección NE-SW y pasa por los pozos PAB-27 (135), Guarda (137), Calvillito 1 (99), Calvillito 2 (98) y PPBA-5 (102), los cuales se encuentran ubicados dentro del lomerío, con excepción del pozo PAB-27 (135) que se encuentra en el valle.

Como se puede observar en la sección, todos los pozos ubicados en los lomeríos cortan tanto a la Toba Aguascalientes como a la Toba Zoyatal. Los pozos Calvillito No. 2 y PPBA-5 además de cortar las unidades anteriores cortan al Material Aluvial del Terciario.

La Ignimbrita fué alcanzada únicamente por el pozo PPBA-5 y su posición bajo la Toba Zoyatal a lo largo de la sección hasta la falla es inferida, puesto que en otros pozos se ha encontrado esta relación de contacto.

El pozo ubicado en el valle se encuentra atravesando más de 200 m de material aluvial. La diferencia de los materiales que corta este pozo y los ubicados en los lomeríos indica la presencia de la falla.

#### SECCION III-III'

Se elaboró esta sección, con la información de 3 pozos, de los cuales 2 se encuentran ubicados dentro de la zona de lomeríos y uno en el Graben, dichos pozos son: PAB-8 (147), PPGBA-6 (145) y el PAB-27 (135).

Los pozos que se encuentran en la zona de lomeríos, cortan a la Toba Aguascalientes, la Toba Zoyatal y al Material Aluvial del Terciario. Hacia el oriente la Toba Aguascalientes es sustituida por el Material Aluvial del Terciario, el cual se encuentra interdigitado con la Toba Zoyatal.

El pozo PAB-27 (135) corta material aluvial. Se puede observar claramente el cambio de materiales entre los pozos PAB-27 (135) y PAB-8 (144) lo que en este caso se explica por la presencia de la falla oriental del Graben.

#### SECCION IV-IV'

Tiene una orientación SE-NW, fué elaborada con la información de 6 cortes litológicos.

En la sección se aprecia que los pozos CAPA 82 (74) y SARH 1197 (80), se encuentran dentro del Valle de Aguascalientes y por lo tanto están cortando material aluvial. Los pozos 1941 (92), PAB-45 (117), Guarda (137) y PAB-8 (147) se encuentran ubicados en la zona de lomeríos y están cortando a la Toba

Aguascalientes y la Toba Zoyatal, comparando la información del pozo SARH 1197 (80) y el pozo 1941 (92). En el pozo PAB-45 (117) se encontró a la Ignimbrita a 172 m.

#### SECCION V-V'

Esta sección se inicia en el pozo PAB-45 (117) ubicado en los lomeríos que se encuentran en la intersección de los Arroyos Paso Hondo y Calvillito al sureste del Estado y termina en el pozo Cobano (16) localizado al norte de la Ciudad. La orientación de la sección es NW-SE.

La sección está compuesta en total por 8 pozos los cuales son: PAB-45 (117), 1941 (92), Morelos 3 (64), Morelos 4 (56), 93 (51), IV Centenario (44), 1060 (22) y Cobano (16), los dos últimos pozos se encuentran en el graben atravesando material aluvial. Los pozos restantes se localizan en la zona de lomeríos.

El pozo IV Centenario, encuentra dos unidades, la Toba Aguascalientes (Tma) y la Ignimbrita (Tmi), con espesores de 6 y 300 m respectivamente. El pozo PAB-45 corta la Toba Aguascalientes (Tma) y Toba Zoyatal (Tmz) con espesores de 30 y 256 m respectivamente, mientras que para la Ignimbrita (Tmi) el máximo atravesado es de 150 m.

Por otro lado, los pozos Morelos-3 y Morelos-4, aparte de atravesar a los materiales antes mencionados, cortan Brecha Volcánica, con espesores de 30 y 70 m respectivamente.

Por último, el pozo 1941 corta dos unidades que son, la Toba Aguascalientes y la Toba Zoyatal, con espesores de 20 y 200 m.

Cabe mencionar que la sección presenta elementos estructurales, que son: la falla que forma al graben de Aguascalientes en su flanco oriente y las fracturas que se localizan principalmente en las tobas.

#### SECCION VI-VI'

El trazo de esta sección inicia en el pozo PAB-45 (117) y termina en el pozo Cobano (16) ubicado al norte de la Ciudad de Aguascalientes, además se emplearon en esta los pozos del fraccionamiento Ojo Caliente. Para la construcción de la sección se utilizó la información de los pozos: PAB-45 (117), 1941 (92), Morelos 5 (58), 95 (49), 92 (33), Cumbres (21), 1060 (22), Cobano (16).

Esta sección tiene una orientación NW-SE.

Como se puede observar en la sección, los pozos PAB-47, 1941, Morelos 5, 95, 92 y Cumbres, ubicados en la zona de lomeríos atraviesan a la Toba Aguascalientes con espesores que varían de 20-34 m; a la Toba Zoyatal con espesores variables de 100 a 300 m y a la Ignimbrita no se le determina espesor ya que

los pozos no alcanzan su base, pero se le considera un espesor mínimo de 300 m en la zona. Los pozos 1060 y Cobano se ubican en el graben cortando más de 200 m de material aluvial.

Los pozos Morelos-5 y Cumbres además de atravesar a los materiales anteriormente mencionados, cortan Brecha Volcánica teniendo esta en ambos pozos, 30 m de espesor.

Por último, el pozo Morelos-5 atraviesa lentes de arcilla, en espesores de 180 y 80 m cada uno.

Las secciones VII y VII' (Plano III.4.3), atraviesan el área casi E-W y N-S respectivamente, en estas se indican algunas estructuras regionales importantes a las que se les ha inferido el desplazamiento de acuerdo a las evidencias del subsuelo.

En la sección VII-VII', se aprecian cuatro fallas normales, mismas que se indican con línea punteada debido a que su traza en superficie se encuentra parcialmente cubierta por suelos o materiales de acarreo, aunque algunas fallas se manifiestan superficialmente como arroyos principales.

En la sección VIII-VIII' se presentan cuatro fallas normales, que se representan con línea punteada también y que inician bajo de la Toba Aguascalientes, ya que esta última por su litología se encuentra enmascarando los rasgos superficiales. En esta sección es notoria la presencia de afloramientos de las Brechas Volcánicas del Terciario Medio en el extremo meridional de la sección.

### III.4.3 GEOMETRIA DE LAS UNIDADES DE INTERES HIDROGEOLOGICO.

Para fines geohidrológicos, se consideran de interés la unidades que conforman el sistema acuífero de la zona. Tales unidades son: la Toba Zoyatal, el Aluvión Terciario, las Secuencias Ignimbríticas y los materiales aluviales que rellenan el Graben de Aguascalientes. Sin embargo, esta última unidad por encontrarse fuera de área principal de interés, no se considera en esta descripción. En cuanto a las secuencias Ignimbríticas, se juzgó conveniente obtener la cima pues son muy escasos los datos sobre su espesor en el área de estudio.

Las figuras que se incluyen en las descripciones siguientes, por limitaciones inherentes a las características del paquete de cómputo empleado en la configuración, solo cubren el área con datos. Por tal motivo se incluye un croquis de localización en cada una de ellas.

#### Toba Zoyatal

La toba Zoyatal, se distribuye principalmente en la región centro oriental del área a partir de la falla oriente del Graben de Aguascalientes. La distribución de sus espesores

se muestra en la figura III.4.4, de donde se observa que el mayor espesor se encuentra al sur de la zona de Ojo Caliente donde alcanza un espesor máximo de 376 m, el cual se puede explicar observando la cima de las secuencias ignimbríticas (figura III.4.6), de donde puede deducirse que dicho espesor se debe a la presencia de una depresión, la cual, se encuentra rellena por el material de la Toba Zoyatal. El menor espesor de esta unidad, se presenta en la porción SE del área de estudio, lugar en que solo alcanza espesores de 60 m. Esto se debe a que en esta porción se encuentran importantes espesores del Aluvión Terciario, que reemplaza a este material, interdigitándose con el mismo (ver capítulo III.2 y las secciones geológicas en la figura III.4.2) .

El Aluvión Terciario se distribuye en el subsuelo principalmente en la porción oriental del área (figura III.4.5). Su espesor mínimo se encuentra en el pozo Zoyatal en donde alcanza solo 40 m. Por otro lado el espesor máximo se encuentra en el pozo SAA-21, donde presenta 266 m de espesor. No obstante la región donde el espesor se mantiene relativamente constante (entre los 100 y 200 m), es la parte sudoriental del área en estudio. Se observa también una correspondencia entre la forma de la cima de la secuencia ignimbrítica (figura III.4.6), con los espesores del Aluvión Terciario. Esto último es más notorio en la porción centro oriental.

#### Cima de la Secuencia Ignimbrítica

Partiendo de las profundidades a las que se alcanzó la secuencia ignimbrítica, se configuró la elevación de cada uno de los puntos en los que esto ocurrió, con el fin de obtener la cima de estas rocas, ya que, tomando en cuenta los rendimientos obtenidos en pozos que extraen agua de esta secuencia, es conveniente para fines de prospección geohidrológica, contar con un modelo lo más aproximado posible de su geometría en el subsuelo (figura III.4.6).

En la figura III.4.7 se aprecia en isométrico la morfología de la cima de las Secuencias Ignimbríticas, de donde se distingue la presencia de tres zonas altas y una depresión que se forma hacia la zona de Ojo Caliente. Asimismo, se observa otra depresión en la parte central que se alinea con la parte occidental más profunda. Esta última depresión se interpreta como la posible existencia de un pequeño graben orientado casi E-W, por otro lado, la discontinuidad en las curvas puede estar indicando la presencia de otras fallas con orientaciones similares a las encontradas en superficie.

# Isopacas Aluvión del Terciario

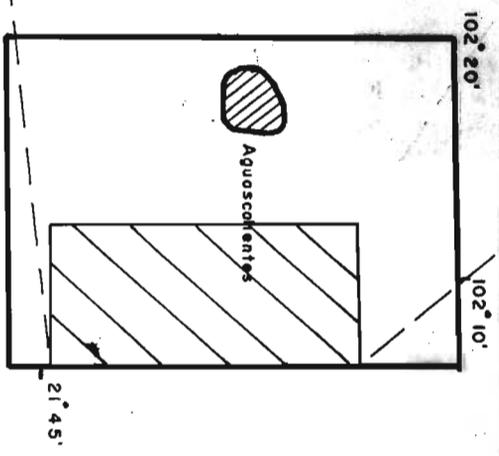
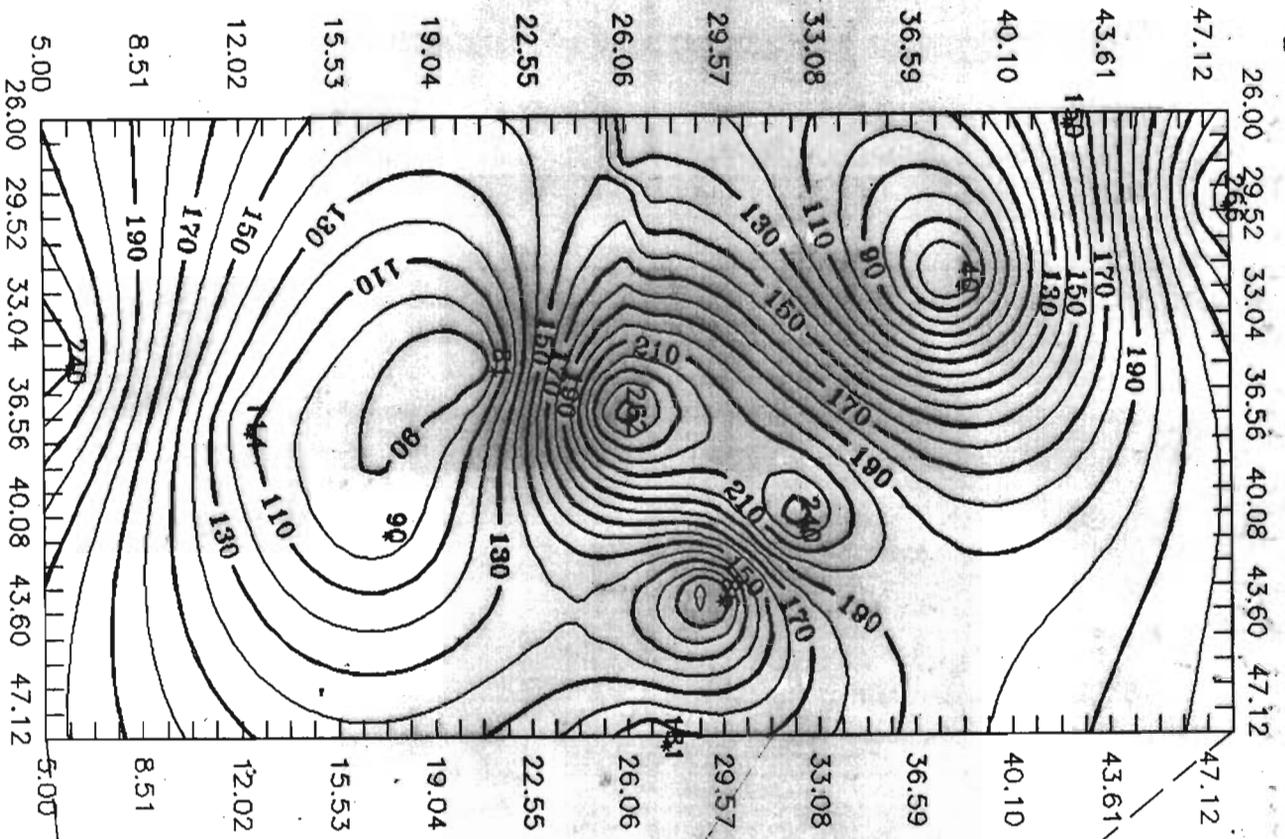


Figura. III. 4.5

# Isopacos Toba Zoyatlán

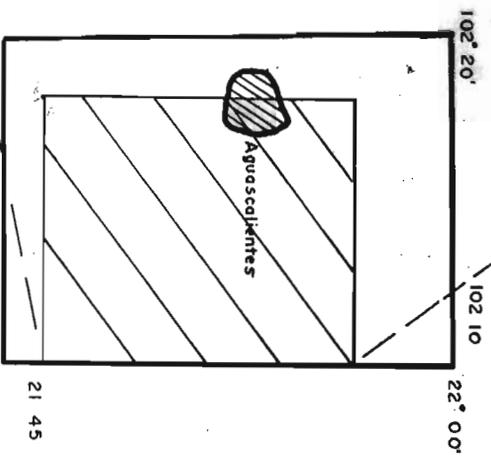
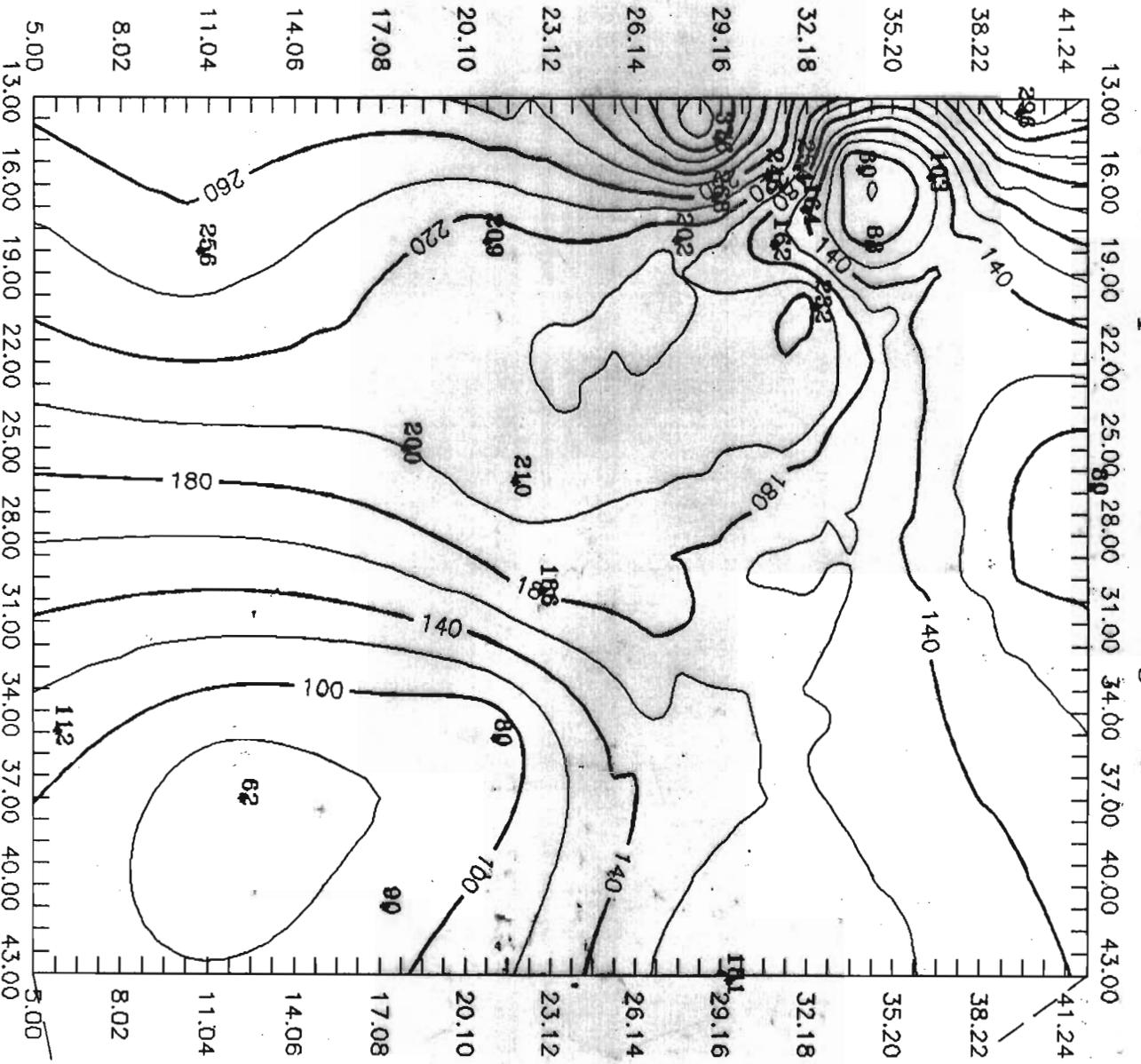


Figura. III. 4.4





### III.5 Geología Histórica y Tectónica

A partir del depósito de la Formación Cuesta del Cura, que es la unidad litoestratigráfica más antigua que aflora en la región, es posible resumir la evolución geológica en el tiempo.

El área en estudio, la cual forma parte de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, estuvo cubierta por mares profundos durante el Albiano-Cenomaniano, período en que se depositaron en el fondo oceánico, sedimentos calcáreos y alternancias de materiales arcillosos que conforman la Formación Cuesta del Cura, posteriormente, se incrementó la subsidencia de la cuenca marina en el período Cenomaniano-Turoniano temprano, causando la depositación en un ambiente profundo, de una secuencia de sieno calcáreo arcilloso y arenas calcáreas en estratos delgados que se intercalan con limo y arcilla (Formación Indidura). Sobre la secuencia anterior, la cual está representando un flysch de facies distal, se depositó en el Turoniano de manera transicional, una secuencia de arenas y lutitas, que representa también una secuencia tipo flysch (Formación Caracol), pero su composición -en la que abundan los terrígenos-, se asocia con la proximidad de tierras emergidas al occidente, así como la presencia de deformación y levantamiento correspondientes al inicio de la Orogenia Laramide.

Las secuencias sedimentarias marinas, sufrieron plegamientos y levantamientos originados por el evento tectónico laramídico, mismo que se ha explicado debido a la interacción entre la placa oceánica del pacífico oriental con la placa continental Norteamericana (posiblemente una colisión); al mismo tiempo, el arco magmático que se encontraba en la margen occidental del continente migraba hacia el oriente (Damon et.al., 1981). La duración del mencionado evento orogénico, es del Cretácico Tardío (Campaniano-Maestrichtiano) al Terciario Temprano (Paleoceno) (Coney, 1976; Damon et. al. op.cit.).

Un hiato importante ocurrió entre las rocas cretácicas y el evento magmático iniciado a principios del Oligoceno (35 Ma), el cual sepultó la topografía desarrollada en más de 10 Ma, con secuencias de ignimbritas, en el período de tiempo: Oligoceno temprano-Oligoceno Tardío (35-27 Ma) (McDowell y Clabaugh, 1981). Dicho vulcanismo ha sido asociado a la subducción de la placa oceánica Farallón por debajo de la placa continental Norteamericana. Y se considera que el fin de la actividad volcánica de este arco, coincide con el cese de la subducción antes mencionada, que se explica por la colisión del sistema de acreción de la placa paleopacífica (dorsal) con la margen continental Norteamericana. Lo cual ocurrió hace 29 Ma (Atwater, 1970), produciendo un margen de falla transforme y dos uniones triples que migraron de manera independiente. Los datos paleomagnéticos indican que la reorientación principal ocurrió hace 26 Ma (Handschumacher, 1976). Durante este período se formó la caldera de Tepezalá, que constituye el centro volcánico del

que fueron extruídas las secuencias ignimbríticas del Terciario Medio que afloran en el área. En cuyas dos últimas fases explosivas, ocurrió la extrusión de los piroclásticos que dieron origen a las tobas Zoyatal y Aguascalientes. La presencia de otras estructuras similares en la región podría haber influido la heterogeneidad de la litología en las secuencias ignimbríticas encontradas en el subsuelo y al mismo tiempo, entre evento y evento, se vió favorecida la acumulación de grandes espesores de materiales aluviales.

El reordenamiento de las placas tectónicas al occidente, provocó que una vez eliminada la fuente principal de esfuerzos compresivos, ocurriera una distensión principal de las rocas en sentido opuesto a la compresión a que estaban sometidas, causando que la placa Norteamericana, sufriera una extensión que dió origen a fosas y pilares tectónicos orientados NE-SW, N-S, y NW-SE, que en el centro del continente (Meseta Central en México), conforman el evento denominado "Basin and Range", provocando un adelgazamiento de la corteza, lo cual explica la ocurrencia de basaltos fisurales en otras localidades (Coney, 1989). Es durante este evento que se formó el Graben de Aguascalientes, lo cual ocurrió de manera gradual, permitiendo la depositación de una potente secuencia de sedimentos lacustres y fluviales durante el período Mioceno Tardío-Pleistoceno. Los lacustres, se encuentran principalmente en la porción central del mismo donde forman una potente secuencia (300 m) (Martínez-Ruiz, 1984); los fluviales, se presentan en forma de paleocauces y antiguos abanicos aluviales.

Durante el Pleistoceno, el clima en la región era propicio para la proliferación de la fauna, como lo demuestran los restos fósiles de siete tipos de caballos, cuatro de camellos, cuatro de alce y cinco de tortuga (Mooser, 1959; Mooser y Dalquest, 1975; Mooser, 1980). Los cambios de clima durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno, dieron lugar a que la zona sea más árida y los paleosuelos del Pleistoceno sean retrabajados y erosionados en los arroyos, dejando al descubierto restos de fósiles y las rocas volcánicas del Terciario.

IV.- G E O F I S I C A

## **IV GEOFISICA**

### **IV.1.- Introducción**

El presente estudio de Exploración Geofísica se conformó de 50 Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.) realizados con el dispositivo tipo "Schlumberger" con una abertura máxima de electrodos  $AB/2=1000m$ .

Los S.E.V. tienen por objeto determinar la distribución espacial de la resistividad debajo de los centros de los S.E.V.'s y con ello estimar la continuidad, límites y espesor de los materiales que constituyen el subsuelo.

Por otra parte, se analizó e interpretó la información de gravimétrica con objeto de conocer, a nivel regional, las principales estructuras y rasgos geológicos en el área, así como apoyar la interpretación geoelectrica. Para ello se considero, principalmente, los resultados de los mapas de Anomalía de Bouguer, Regional y Residual.

Los resultados obtenidos se presentan a través de: mapas de resistividad real, secciones geoelectricas, mapas de anomalía residual y regional, secciones de anomalía gravimétrica, así como un mapa de la cima de la roca ígnea.

#### **IV.1.1.- Actividades de Campo.**

Levantamiento geofísico de 50 S.E.V., mediante la aplicación del dispositivo tetraelectrónico "Schlumberger", con abertura máxima entre electrodos de corriente  $AB=1200 m$ .

#### **IV.1.2.- Actividades de Gabinete**

- Recopilación y análisis de la información geológica geofísica y geohidrológica, de la zona de estudio.
- Elaboración de un mapa de localización de S.E.V. y secciones geofísicas
- Verificación de los valores de resistividad aparente para todos los sondeos.
- Análisis gráfico de las curvas con el objeto de hacer continuas la curva de resistividad aparente de campo.
- Elaboración de la tabla de valores de resistividad aparente.
- Interpretación automática de S.E.V.
- Análisis e Interpretación de la información gravimétrica.
- Elaboración de mapas y secciones geofísicas.

- Interpretación y correlación de datos geológicos, geofísicos y geohidrológicos.

#### **IV.2.- Exploración Geoeléctrica.**

##### **IV.2.1.- Ejecución y Procesamiento de Sondeos Eléctricos Verticales.**

###### **IV.2.1.1.- Características del Equipo Empleado**

En el presente estudio se utilizó un circuito de transmisión y otro de recepción independientes entre si para evitar inducciones.

La fuente de poder corresponde al modelo TSQ-2E de marca "Scintrex" alimentado por un motor generador, cuya potencia media es de 500 watts. el voltaje generado puede seleccionarse de 100 a 1200 volts, con capacidad de hacer circular una intensidad de corriente hasta de 5 amperes y cuenta con un medidor digital de corriente.

El receptor es un modelo IPR-10 de marca "Scintrex", capaz de medir diferencias de potencial de 0.001 hasta 3 k voltios, con un error de más o menos 5%. este instrumento compensa por oposición las corrientes parásitas y el potencial natural que existe en el subsuelo.

Como equipo complementario se utilizaron electrodos de acero inoxidable (A y B) y electrodos de cobre (M y N), y cable necesario para las conexiones, carretes móviles y herramienta accesoria.

###### **IV.2.1.2.- Ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales**

La ubicación de los s.e.v. y perfiles se muestra en el plano anexo ver mapa (4.1).

Para la toma de datos se utilizó el dispositivo "Schlumberger". Las semiaberturas entre los electrodos de corriente seleccionadas fueron de: 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 85, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, y 1000.

Para la realización de cada s.e.v. se utilizó la técnica de carrito móvil a fin de reducir las posibles fugas de corriente y garantizar la calidad de los datos de campo.

Durante la toma de datos se cuidó de eliminar correctamente el potencial natural en los electrodos de potencial en cada estación, previa a las lecturas de intensidad de corriente y de diferencia de potencial.

Conocidas las distancias interelectródicas del dispositivo "Schlumberger" y la lectura del resistivímetro se procede a calcular los valores de resistividad aparente y graficar los resultados en papel bilogarítmico. Lo anterior, se realiza con objeto de cuidar el comportamiento de las curvas de campo. En caso de que hubiera algún valor dudoso, se procede a repetir las lecturas.

Debido a que los valores de resistividad disminuyen entre cada estación, de tal forma que la escala utilizada no permite su correcta lectura, es necesario efectuar la operación llamada "empalme" es decir; la toma de lecturas dobles de resistividad aparente, de cuando menos dos semiaberturas de los electrodos de corriente para dos aberturas de los electrodos de potencial.

#### **IV.2.1.3.- Procesamiento de S.E.V. a través de Métodos Automáticos**

El procedimiento para la interpretación de cada uno de los cincuenta S.E.V. fué el siguiente:

Recálculo de los valores de resistividad aparente, a partir del factor geométrico, los valores de intensidad de corriente y de la diferencia de potencial. Con estos datos se procede a calcular la tabla de valores de resistividades aparentes de campo, que se utilizan para el trazado de curvas de resistividad aparente en papel bilogarítmico.

El análisis gráfico de las curvas permite definir el movimiento de los arcos de la curva que se obtuvieron en el campo para cada una de las aberturas de los electrodos de potencial (MN). Estos "empalmes" se unen gráficamente desplazándolos paralelamente hasta obtener una curva continua.

Una vez que se tienen las curvas de resistividad aparente, suavizadas y continuas se procede a la digitización de las curvas obteniendo de ellas, seis muestras por cada ciclo logarítmico (ver tabla de valores de resistividad aparente).

La interpretación automática de los s.e.v. se efectuó de acuerdo con el método y programa de cómputo elaborado por Zohdy(1989).

Los modelos geoelectrónicos obtenidos (modelo inicial) se ajustaron de acuerdo a la información geológica disponible, (Registros Eléctricos, Cortes litológicos, etc.), hasta obtener un modelo geoelectrónico final acorde con las condiciones reales del subsuelo.

Los resultados obtenidos de cada modelo fueron transformados en valores de contorno de resistividad real a diferentes intervalos: 1, 2, 3, 4.5, 7, 10, 10 20, 30 ,45, 70 100, etc., estos

contornos se vaciaron en los perfiles geoelectricos correspondientes y se configuraron entre los S.E.V.'s, a fin de obtener un modelo geoelectrico bidimensional del subsuelo.

#### **IV.2.2.- Características y Descripción de las Secciones Geoelectricas**

##### **IV.2.2.1.- Características de las Secciones Geoelectricas.**

Se elaboraron seis perfiles de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Se configuraron las pseudosecciones de resistividad aparente, útiles para la interpretación cualitativa bidimensional.

Con los resultados de la interpretación automática -modelo final- se procedió a la elaboración de perfiles geoelectricos, que muestran la continuidad de las capas en el subsuelo. Con el auxilio de las pseudosecciones de resistividad aparente se determinó una posible estructura bidimensional.

Los perfiles geofisicos obtenidos muestran la distribución espacial de la resistividad pero sin sentido geológico o hidrogeológico alguno. Para obtener una sección adecuada de acuerdo con los objetivos del presente trabajo, se consideró toda la información de los pozos que quedaban ubicados sobre o cerca de las secciones. De igual manera se vació la información de los rasgos estructurales que pudieran servir de apoyo a la interpretación geofisica.

##### **IV.2.2.2.- Descripción de los Perfiles Geoelectricos.**

###### **PERFIL I-I'**

Tiene una orientación SW-NE y consta de tres S.E.V.'s: p17, p18 y 24. Esta sección se extiende sobre el cauce amplio del arroyo de "San Nicolas", partiendo de la cota 1950 m.s.n.m. hasta la cota 1990 m.s.n.m. Ver plano(IV.3)

Bajo los S.E.V.'s p17 y p18 se observa una serie de estratos alternados con valores de resistividad medias a bajas, los cuales se agruparon en las unidades F y E, esta última envuelve a la unidad F, dándole una forma de lente que se acuña en dirección de la unidad E.

Al final del perfil a una profundidad de aproximadamente 250m se detecta un estrato resistivo (F') que se profundiza en dirección del S.E.V. 18.

En el S.E.V. 24 se presenta una variación en el espesor y resistividad de las capas similar a los detectados bajo el S.E.V. p17.

Los S.E.V.'s p4, 26, y 25 son casi paralelos a esta sección, aunque topográficamente se extienden sobre la cota 2000 m.s.n.m., por lo anterior la cobertura detectada en ellos aumenta considerablemente antes de que las curvas empiecen a adquirir valores altos de resistividad.

Las características generales de este perfil se resumen en la siguiente tabla:

PERFIL I-I'

UNIDAD GEOELÉCTRICA	VALORES DE CONTORNO (OHMS-)	ESPESOR (m)
E	20-100	113-INDEF.
F	10-70	80-300
F'	100-2000	INDEFINIDO

PERFIL II-II'

Se compone de cinco S.E.V.'s: p9, 9, 6, 28 y 27 con una longitud total de aprox. 12 km. y una orientación SW-NE. Tiene una densidad mayor de S.E.V.'s en la parte baja de la zona de "Ojo Caliente". Ver plano (IV.3).

El perfil parte de la cota 1890 msnm, continua sobre el arroyo "Don Pascual" para finalizar en la cota 2000 m.s.n.m.

De acuerdo a la interpretación de los S.E.V.'s fué posible diferenciar cinco unidades geoelectricas cuyas características se resumen en la siguiente tabla:

PERFIL II-II'

UNIDAD GEOELECTRICA	VALORES DE CONTORNO (OHMS-)	ESPESOR (M)
D	7-10	10-100
E	40-300	10-350
F	20-70	10-INDEF.
G	30-150	50-150
H	30-1000	INDEF.

Bajo los S.E.V.'s p9, 9 y 6 se diferencia la unidad D cuyo máximo espesor se localiza bajo el S.E.V. 6 y que se acuña en dirección del S.E.V. 28. Bajo estos S.E.V.'s, se localiza una unidad de media y alta resistividad que subyace a las unidades anteriores y que tiende a profundizarse en dirección del S.E.V. 28.

De acuerdo con la información recopilada de los pozos cercanos a esta sección, bajo los S.E.V.'s p9 y 9 se encuentra la roca riolítica a profundidades someras y cubierta por capas de toba arcillosa de espesor creciente en dirección NE. Estas características litológicas se reflejan en las variaciones de alta a media mediana resistividad bajos los S.E.V.'s p9 y 9.

En dirección del los S.E.V.'s 28 y 27 se nota una disminución de los valores de resistividad lo cual se asocia con una cobertura litología diferente a la de los S.E.V.'s anteriores.

PERFIL III-III'

Se extiende a lo largo del arroyo denominado: "El Cedazo" y cubre una longitud aprox. de 16Km. La sección esta compuesta de ocho S.E.V.'s: 1, j4, 10, 16, 22, 20, 21 y 23. La orientación del perfil a la altura de la zona "Casa Blanca" hasta el poblado de "Norias de Ojocaliente" es SW-NE, en este último sitio cambia de orientación. El perfil se inicia en la curva 1900 m.s.n.m continuando sobre el arroyo hasta alcanzar la cota 2000 cerca del S.E.V. 23. Ver plano(IV.4).

De acuerdo a la interpretación de los S.E.V.' se lograron diferenciar seis unidades geoelectricas cuyas características se resumen en la tabla:

PERFIL III-III`

UNIDAD GEOELECTRICA	VALORES DE CONTRORNO (OHMS-)	ESPESOR (M)
D	7-45	1-123
E	30-450	10-262
F'	70-100	5-100
F	15-30	90-INDEF.
G	7-20	50-90
H	10-20	INDEF.

Bajo los S.E.V.'s 1 al 10 se detectan varios estratos de baja resistividad que estan agrupados en la unidad D y que presentan su máximo espesor bajo el S.E.V. j4 acuñándose horizontalmente a partir de este último. A una profundidad de aprox. 250m. se detecta un contacto de resistividad asociado a las unidades G y H y el cual se profundiza en dirección del S.E.V. 16.

Bajo los S.E.V.'s 22 al 23 las unidades G y H se profundizan, posiblemente hasta profundidades mayores de 600 asimismo, se muestra un incremento en los valores de resistividad asociados a la unidad F cuyo espesor es indeterminado. Finalmente, bajo los S.E.V.'s 21 y 23 se infiere nuevamente la presencia de las unidades G y H, esta última a una profundidad aproximada de 300m.

Para realizar la correlación de los resultados obtenidos en esta sección se consideró la información de los pozos: Morelos IV, V, etc.

PERFIL IV-IV'

Se compone de seis S.E.V.'s: 29, p5, p1, p3, p2, y p14 que se extienden a lo largo del arroyo "Paso Hondo", además de contar con varios S.E.V.'s cercanos (p15, p13, j1, j5, p5, 2 y 3) que proporcionaron mayor información de dicha área. La orientación del perfil es de SW-NE, el tendido esta comprendido entre las cotas 1900 y 2000 m.s.n.m. Ver plano(IV.5).

De acuerdo a la interpretación y correlación de los S.E.V.'s se lograron diferenciar 10 unidades geoelectricas cuyas características se resumen en la siguiente tabla:

PERFIL IV-IV`

UNIDAD GEOELECTRICA	VALORES DE CONTRORNO (OHMS-)	ESPESOR (M)
A	20-45	1-30
B	7-30	1-120
C	15-150	100-325
C'	150-700	INDEF.
D	100-500	1-30
E	70-100	177-315
F	45-70	10-INDEF.
F'	100-450	INDEF.
G	70-100	60-INDEF.
H	100-150	INDEF.

De acuerdo a las características de los S.E.V.'s el perfil se pudo dividir en dos secciones: la primera incluye a los S.E.V.'s 29 y 5 bajo los cuales se detectaron materiales estratificados de baja y alta resistividad. Estos materiales muestran una discontinuidad geoelectrica lateral en dirección al S.E.V. 1, esta diferencia de resistividad lateral esta asociada con una falla geológica.

La segunda parte del perfil muestra otros valores de resistividad que estan asociados a diferente tipo de material geológico. Bajo los S.E.V. p1, p3, y p2 se detecta, en la parte superior, un estrato de resistividad media que se acuña en dirección del S.E.V. p14.. La parte inferior del S.E.V. p1 se diferenciaron las unidades G y H que se profundizan, sin volver aparecer, en dirección del S.E.V. p3.

En la parte media y baja de los S.E.V.'s p3 y p2 se presentan materiales más o menos estratificados cuya resistividad se incrementa con la profundidad y cuyo espesor final es indeterminado. Finalmente, bajo el S.E.V. p14 se conserva la

misma secuencia que en S.E.V. p2, difiriendo de este último en la parte más profunda donde los valores de resistividad se incrementan notablemente a partir de los 350M aprox.

**PERFIL V-V'**

Se compone de cuatro S.E.V.'s: 6, 18, 15, y 17 orientados con un rumbo WE que cambia en la localidad del "Gato" en dirección NE. Parte de un arroyo que desemboca en la localidad de "Los Arellano" y continua hasta terminar en "Calvillito". Ver plano(IV.6).

El perfil manifiesta una discontinuidad eléctrica entre los materiales de alta resistividad bajo el S.E.V. 6, y el resto de los S.E.V.'s. Esta discontinuidad se puede asociar a una falla geológica.

De acuerdo a la interpretación de los S.E.V.'s se lograron diferenciar las siguientes unidades geoelectricas cuyas características se resumen en la siguiente tabla:

**PERFIL V-V'**

UNIDAD GEOELECTRICA	VALORES DE CONTORNO (OHMS-)	ESPEJOR (M)
A	15-45	1-50
B	70-100	30-72
C'	150-450	INDEF.
D	70	10-25
E	70	43-180
F	7-15	10-170
F'	20-70	100-INDEF.
G	30-45	36
H	45	INDEF.

Los materiales bajo los S.E.V.'s 18, 15, y 17 presentan una estratificación horizontal similar al perfil IV, aunque por el desnivel topográfico existente, los espesores de las capas tienden a aumentar y a profundizarse los contactos resistivos inferiores, particularmente las unidades G y H.

**PERFIL VI-VI'**

Se compone de cuatro S.E.V.'s: p7, p8, p12, y p11, que se alinean paralelamente al cauce del arroyo "Montoro-Las Venas", en las cotas topográficas 1900 hasta la 1980 m.s.n.m. Existen en el área otros S.E.V.'s contiguos (p10 y p16) que se utilizaron para correlacionar esta sección. Ver plano(VI).

De acuerdo a la interpretación de los S.E.V.'s se lograron diferenciar cuatro unidades geoelectricas cuyas características se resumen en la siguiente tabla:

**PERFIL VI-VI'**

UNIDAD GEOELECTRICA	VALORES DE CONTORNO (OHMS-)	ESPESOR (M)
A	70-200	1-53
E	45-300	10-180
F	70-100	30-123
F'	100-150	INDEF.

Este perfil muestra varias unidades estratificadas que difieren principalmete en la parte superior de los S.E.V. p7,p8 y p12, p11. En los primeros, se presentan valores resistivos de medios a altos mientras que en los segundos son valores medios a bajos. Lo anterior, se puede asociar al diferente tipo de material granular que cubre el subsuelo, siendo en el caso de los S.E.V.'s p7 y p8, posibles materiales arenosos mientras que en los otros S.E.V.'s materiales granulares finos.

#### **IV.2.3.- Interpretación de Resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales**

En la interpretación cuantitativa se consideró que el modelo georresistivo del subsuelo es unidimensional, es decir que la resistividad verdadera solo varia con la profundidad de tal manera que el subsuelo se puede simular como un medio estratificado.

Para obtener interpretaciones bidimensionales, se elaboraron perfiles de isorresistividades aparentes. Esto permitió conocer, cualitativamente, la estructura georresistiva y continuidad lateral de los estratos del subsuelo, debajo del perfil.

A fin de dar una idea del comportamiento general georresistivo de la zona se construyeron Mapas de Resistividad real a diferentes profundidades. Esto permite conocer de manera general la estructura del subsuelo en forma tridimensional.

Para realizar la correlación Geológica-Geofísica, fue necesario considerar diferentes factores físicos y geológicos que actúan en forma aislada, o conjunta, y que modifican los valores de resistividad obtenidos en el campo como son:

##### **Factores Físicos:**

- 1.-Temperatura
- 2.-Permeabilidad y Porosidad de las rocas
- 3.-Saturación y Calidad del agua contenida en las rocas

##### **Factores Geológicos:**

- 1.-Tipo de roca presente en el subsuelo
- 2.-Presencia de arcilla
- 3.-Fracturamiento de la roca

#### **IV.2.3.1 Mapas de Resistividad Real**

Los mapas se elaboraron configurando los valores de resistividad real obtenidos en cada uno de los 50 S.E.V.'s a diferentes profundidades: 100, 200, 300, y 400 m. Ver mapa (IV.2).

Para su interpretación se configuraron solamente las isoclinas fundamentales 10, 15, 20, 30, 45, 70, 100, etc. Asimismo, se seleccionaron cuatro rangos de resistividad; 1-30, 30-70, 70-150 y mayores de 150 (ohms-m), con objeto de agrupar y estudiar áreas con características resistivas similares.

En general, los mapas muestran la distribución de materiales de baja y media resistividad orientados en dirección SW-NE formando una depresión cuyo espesor es variable y se profundiza en su parte central.

#### Descripción

##### Mapa de resistividad real a 100 m

Predominan en el área resistividades medias y bajas. Los bajos resistivos (menos de 70 ohms-m) se orientan en dirección SW-NE y están asociados geológicamente a material granular del tipo de: aluvion, piroclásticos, y tobas (Zoyatal).

A la altura de la Cd. de Ags. y en la parte sur del mapa (SEV P9) se registraron valores de alta resistividad (mayores de 150 ohms-m), estas áreas se asocian con la presencia de la ignimbrita.

##### Mapa de resistividad real a 200 m

Los bajos resistivos continúan cubriendo el área, particularmente del lado NW y se asocian a conglomerados y Toba Zoyatal en las partes NE y SE, respectivamente.

Los altos valores de resistividad se extienden hacia la parte Sur y en los alrededores de la Cd. de Ags., y se les asocia con la Ignimbrita. Cabe señalar que en la zona que comprenden los SEV`s p9 y p17 los valores de resistividad se asocian a la Toba Zoyatal.

##### Mapa de resistividad real a 300 m

La distribución de resistividades es similar al mapa de 200 M. La zona de baja resistividad se divide en dos: la primera incluye del SEV 29 hasta los SEV`s 27, 24 y 23, se asocia a materiales granulares en la parte inferior (sev 29) y a la Toba Zoyatal en la parte media y superior. El segundo bajo resistivo está limitada por los poblados de "El Zapote" y "Calvillito", asociados con material granular, y roca ignimbrítica, respectivamente.

Las áreas de alta resistividad se encuentran bien definidas alrededor de los SEV`s 14, 9 y 8, así como en en la parte sur y norte del mapa. Los altos resistivos se asocian a la presencia de Ignimbrita, salvo en el área Norte (SEV`s p17, p19, p4 ,p20) y alrededor de los SEV`s p5,p6,p7 que se relacionan con materiales granulares.

##### Mapa de resistividad real a 400 m

Las áreas con valores de baja resistividad continúan con una orientación SW-NE y extendiéndose hasta los SEV's 13, 18, 15 y 11, aunque muestran ciertas variaciones en su límite. En en la zona Sur se registran materiales de baja resistividad localizados entre los S.E.V.'s. Estos valores están asociados a materiales granulares y Toba Zoyatal con excepción de la zona de "Calvillito", asociada a roca ígnea fracturada.

Las áreas de alta resistividad manifiestan un incremento en sus valores de resistividad alcanzando rangos de hasta 2000 ohms-m y mostrando una tendencia a extenderse hacia la parte Sur y en forma limitada en el Norte. El área localizada en el S.E.V. 14 mantiene su extensión de los mapas anteriores. La asociación geológica es la misma que en el mapa de 300 M.

**IV.2.4.- Integración y Correlación de Resultados Geoeléctricos y del Subsuelo.**

Con la interpretación de los S.E.V.'s y la información geohidrológica disponible, se asociaron los valores de resistividad con los pozos cercanos a las secciones geofísicas, obteniendo los siguientes resultados:

UNIDAD GEOELECTRICA	VALOR DE CONTORNO (OHMS-M)	LITOLOGIA ASOCIADA
A	20-45	CONGLOMERADO DEPOSITO ALUVIAL
B	7-30	ARCILLA
C	15-150	ARCILLA/ ARENA
C'	150-700	ARENA/ARCILLA
D	7-100	LIMO-ARCILLOSO
E	20-450	TOBA ARCILLOSA
F	10-70	TOBA ARENOSA
F'	70-2000	TOBA ARENOSA Y CLASTOS
G	30-150	BRECHA VOLCANICA
H	10-30	IGNIMBRITA ALTERADA

### **IV.3.- Exploración Gravimétrica**

#### **IV.3.1.- Introducción**

Con objeto de tener un conocimiento más completo de la estructura del subsuelo en el área de estudio, se analizó e interpretó la información gravimétrica disponible. Esta consiste de Mapas de Anomalía de Bouguer y Mapas de Anomalía Residual.

#### **IV.3.2.- Características Generales del Método Gravimétrico**

El método gravimétrico se ubica dentro de los métodos potenciales y se basa fundamentalmente en la medida de pequeñas variaciones del campo gravitacional, asociados con la presencia, de uno o varios cuerpos que producen una anomalía debida a un contraste de densidad. Las anomalías gravimétricas provienen de variaciones horizontales en el valor de densidad.

Suponiendo que la tierra estuviera formada por materiales estratificados de densidad uniforme, no habría anomalía gravimétrica. Cuando estas rocas de diferente densidad se encuentran distorsionadas (afallamientos, plegamientos, levantamientos, etc.) entonces se produce una anomalía gravimétrica.

En la fig. No.4.1, se representa un conjunto de estratos de diferentes densidades los cuales están levantados en la parte central. Los estratos con comportamiento horizontal no presentan anomalía gravitacional alguna porque no existe variación horizontal de densidad; en la parte central del levantamiento se produce una anomalía gravimétrica debido a la distorsión de las capas y al efecto de contrastes de densidad.

En este ejemplo, donde cada capa tiene sucesivamente mayor densidad a mayor compactación, todos los contrastes de densidad son positivos y la suma de todos sus efectos producen la anomalía positiva indicada en el perfil gravimétrico. De lo anterior se desprende que existe una correlación directa entre la distorsión de las rocas del subsuelo y la anomalía gravimétrica producida.

La magnitud y forma del efecto gravimétrico depende: de las magnitudes de las densidades involucradas, del relieve vertical, profundidad y extensión horizontal. Si existieran capas de densidad uniforme no se produciría anomalía por más deformadas que estas estuvieran. Por lo tanto la propiedad fundamental de las rocas que relaciona la anomalía gravimétrica con la Geología es la densidad de todos y cada uno de los componentes de una columna estatigráfica y sus respectivos contrastes.

### **IV.3.3.- Análisis de Información Gravimétrica**

#### **IV.3.3.1.- Consideraciones**

La Prospección Gravimétrica es ante todo un método de reconocimiento, en estas condiciones hay que limitarse a efectuar una interpretación cualitativa que permita delimitar las zonas donde vale la pena proseguir los trabajos de prospección. Una vez efectuadas las primeras perforaciones, que aporten las líneas generales de la geología es posible emprender una interpretación cuantitativa.

Una interpretación rápida de un mapa gravimétrico de reconocimiento se puede realizar recordando que las anomalías positivas son debidas a un exceso de masa y corresponden a: coladas de lava, engrosamientos de las calizas, anticlinales calcáreos o a levantamientos del basamento; las anomalías negativas hay que atribuirlos a engrosamientos de las series arenosas, areniscas, arcillosas o margosas y, también, a depósitos de sal.

Considerando los párrafos anteriores, se procedió a al análisis e interpretación de resultados que se describen a continuación:

La configuración de la anomalía de Bouguer corregida y sin corregir por relieve topográfico, así como las anomalías regional y residual, muestran el comportamiento estructural del subsuelo en el área por lo que pueden emitirse varias conclusiones que expliquen la configuración del mismo.

Aunque el área es relativamente pequeña se piensa que, al igual que en otros lugares del prospecto, la topografía y los cambios laterales de densidad influyen poco sobre el aspecto gravimétrico regional.

La información de los planos de anomalía que constituyen el prospecto Aguascalientes y en particular para la zona oriental de lomeríos, reflejan la aparición de anomalías regionales y residuales que aportan una buena idea de la condición estructural del subsuelo. De esta forma, los altos y bajos gravimétricos coinciden con los altos y bajos topográficos y corresponden con valles y sierras sobre la que descansan estructuras mesozoicas plegadas o bien, que dichos altos y depresiones correspondan a diques basamentales alineados a lo largo y ancho del prospecto.

A continuación se describen la anomalías de mayor interés identificadas en la prospección del área considerando para ello los tres tipos de Anomalías:

#### **IV.3.3.2. Planos de Anomalía de Bouguer Corregida por Relieve Topográfico (Rugosidad).**

En general las anomalías cercanas al área de estudio presentan una orientación regional N-S, quedando ubicados sobre el Valle de Aguascalientes y lomerios orientales, los siguientes alineamientos:

**-Mínimo Sn.Sebastian- Los Dolores- Aguascalientes**

Este alineamiento tiene una orientación general N-S con algunas sinuosidades a lo largo de él. En su parte media hasta su extremo norte (correspondiente al Edo. de Aguascalientes), tiene sus mínimos en cierres bien definidos.

El alineamiento se inicia al poniente de "Sn.Juan de los Lagos" y continua en el estado de Aguascalientes por : "Tanque de los Jimenes", "Cd. de Aguascalientes" y continúa hacia el norte del estado. Tiene valores isoanomalos del orden de -4970 u.g.

La anomalía se puede asociar con rellenos aluviales más o menos extensos y cambia al sur del poblado de "Montoro" a una topografía poco abrupta de sedimentos terciarios lacustres.

**-Máximo Sta.María-Encarnación de Diaz-Calvillito**

Este alineamiento esta claramente definido en el área. En su parte sur la anomalía queda limitada por la curva -4850 u.g.

La configuración de la anomalía en su porción central y norte es considerablemente amplia y hacia el Sur se vuelve delgada y alargada.

El área que ocupa este alineamiento cubre el plano oriental de la falla de "Aguascalientes" sobre una superficie cubierta de tobas, sedimentos lacustres y algunos afloramientos de Riolita.

Estos sistemas de anomalías pudieran considerarse como un reflejo de estructuras sedimentarias asociadas a cambios en el relieve del basamento y ambos cubiertos por una potente sección riolítica.

#### **IV.3.3.3.- Planos de Anomalía Regional**

La anomalía regional refleja los mismos alineamientos descritos para la anomalía de Bouguer, presentando el máximo y mínimo libres de efectos de altas frecuencias.

El sistema de máximos y mínimos muestra el mismo nivel de valores de las isoanomalías, es decir que los máximos presentan la misma culminación y los mínimos la misma profundidad. La anomalía Regional asociada con el basamento, presenta al N y S de la

misma, una serie de alineaciones y depresiones locales, algunas de las cuales pudieran estar asociados a estructuras de sedimentos plegados o también a cuerpos intrusivos que sobresalen a nivel del basamento.

Es importante señalar que el basamento, en todo lo prospectado para el Estado de Aguascalientes, debe estar constituido por una serie de altos y bajos orientados en dirección N-S y con un fondo irregular sobre el cual se depositaron los sedimentos mesozoicos y los depósitos volcánicos.

#### **IV.3.3.4.- Planos de Anomalía Residual**

La configuración de anomalía residual muestra varios máximos y mínimos, algunos conservando la orientación de las anomalías de Bouguer y otros con nuevas orientaciones. Ver plano(IV.8).

Dentro de las máximos y mínimos residuales, que coinciden con los planos de Bouguer y Regional, se encuentran el máximo Sta. María-Encarnación de Diaz-Calvillito y el mínimo Sn Sebastian -Los Dolores- Aguascalientes.

Los máximos que se localizan en la vecindad del área, presentan como rasgo característico altos valores de cierre. En conjunto algunos máximos residuales pueden interpretarse como estructuras mesozoicas plegadas, superpuestas a las que producen el efecto regional, y otros son efectos residuales de las roca volcánicas.

Además de los principales máximos residuales descritos existen otros más pequeños y en menor cierre en isovalores que se concideran de menor importancia.

#### **IV.4.- Integración y Correlación de Información Geoeléctrica, Gravimétrica y Geología del Subsuelo**

El análisis del estudio gravimétrico muestra que el comportamiento de las anomalías de Bouguer y Residual presentan, además de los máximos y mínimos locales mencionados, una serie de mínimos residuales identificados también con los s.e.v., los cuales se pueden asociar con hundimientos de la roca ígnea y aumento en los espesores de los materiales tobaceos. Aunque estas depresiones bien pudieran contener también otro tipo de materiales no tobaceos esto seria el caso de los valles de "Chilacalote" y "Jilotepec", al norte del área de interés.

Con el estudio de las anomalías gravimétricas presentes en los lomeríos orientales del área de interés, se lograron definir varios cierres isoanormales, que en general se relacionan con la disposición de cuerpos volcánicos emplazados en el área como; flujos ignimbríticos y tobas. Estas manifestaciones gravimétricas estan bien localizadas en los máximos gravimétricos de "Ojo Caliente", "Calvillito", y "Presa del Muerto".

#### **IV.4.1.- Configuración de la Cima de la Ignimbrita**

Considerando los resultados obtenidos con la exploración geofísica (geocelétrica y gravimetría) y la información geológica de pozos, se realizó una configuración tentativa de la cima de las rocas ígneas ver capítulo III.4. Para ello se consideró la ubicación de cada S.E.V. con su correspondiente posición topográfica en m.s.n.m..

#### **IV.4.2.- Recomendaciones**

En relación con la presencia de máximos residuales y estructuras plegadas sepultadas, es conveniente observar el comportamiento gravimétrico de estas últimas en áreas vecinas donde se tiene la certeza de que corresponden a pliegues de rocas mesozóicas y posteriormente extrapolar dicho comportamiento, por medio de perfiles gravimétricos y geológicos.

Se recomienda continuar con un estudio gravimétrico a detalle a fin de resaltar los planos de los máximos residuales e identificar y separar los efectos relativos a las rocas ígneas. Todo lo anterior, con objeto de que en un futuro inmediato, se pueda llegar a conocer la topografía del basamento en todo el Edo. de Aguascalientes.

## V GEOHIDROLOGIA

### V.1 Unidades Hidrogeológicas

Las rocas que afloran en la región son ígneas extrusivas y rocas sedimentarias del Cenozoico. La estratigrafía de la región no ha sido establecida formalmente y son escasos los levantamientos geológicos realizados en la región. No obstante, se ha establecido una columna estratigráfica a partir de lo observado en los recorridos de campo, los trabajos geológicos realizados en la región y en los registros de las perforaciones efectuadas con fines de explotación (ver capítulo III.2), la cual se encuentra conformada por las siguientes unidades (de la más antigua a la más reciente):

1. Secuencias Ignimbríticas del Terciario Medio
2. Brechas volcánicas del Terciario Medio
3. Toba Zoyatal
4. Aluvión del Terciario
5. Toba Aguascalientes (Toba con líticos; ceniza blanca; toba arenosa con interestratificaciones de material aluvial).
6. Depósitos aluviales Cuaternarios.
7. Material Residual.

Con los datos con que se cuenta, fue posible hacer una descripción de las principales características que identifican a una unidad hidrogeológica, como son:

- Definición
- Distribución y superficie
- Espesor
- Clasificación hidrogeológica general de las unidades
- Condiciones hidrogeológicas en sus bordes
- Heterogeneidades

La distribución de las unidades aquí descritas se presenta en el mapa hidrogeológico (figura V.1.1).

#### **Ignimbritas**

Se incluyen dentro de esta unidad a las ignimbritas fracturadas, las cuales, se presentan en dos pequeños afloramientos: uno se encuentran en la zona colindante con la traza de la falla oriental del graben de Aguascalientes, y otro en la zona de la presa el Muerto. En el subsuelo se han cortado a profundidades entre los 6 y 425 m. Su espesor rebasa los 300 m. Los pozos que presentan los mayores rendimientos (hasta 120 l/s) explotan esta unidad. Se le considera un acuífero en un medio fracturado de alta permeabilidad. Los pozos perforados en esta unidad poseen rendimientos específicos que varían de 0.183 m<sup>2</sup>/s en el pozo Bolerama a 0.055 m<sup>2</sup>/s en el pozo 89. Del análisis de las diversas

pruebas de bombeo realizadas en los pozos de Ojo Caliente se obtuvieron valores de transmisividad de 1.31 y  $62 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . y coeficientes de almacenamiento de 0.00416 a 0.082.

La circulación del agua en estas rocas se lleva a cabo principalmente a través de su porosidad secundaria (fracturamiento) la cual varía en magnitud y dirección de una zona a otra (ver análisis estructural), que provoca en esta una heterogeneidad horizontal y vertical. Lo anterior se aprecia por algunas de las anomalías que presentan las gráficas  $s\text{-log } t$  (ver subcapítulo de pruebas de bombeo).

La mayoría de los pozos que explotan esta secuencia ponen de manifiesto el comportamiento libre del acuífero. Sin embargo la presencia de una ceniza blanca en el pozo Morelos 5, que sobreyace en dicho sitio a la ignimbrita, hace que el acuífero se comporte como confinado o semiconfinado al explotarse las rocas ignimbríticas.

Una característica importante del agua que circula a través de estas rocas es su calidad química y su temperatura ( $40^{\circ}\text{C}$ ), la cual pone de manifiesto el hidrotermalismo del sistema (ver capítulo VI).

En cuanto a su límite superior, de acuerdo con lo observado en la información de los pozos sobre esta se encuentran la Toba Zoyatal, la brecha volcánica del Terciario Medio y el Aluvión Terciario en la porción central, meridional y sudoriental del área respectivamente. Por su parte el efecto hidráulico en su contacto con el material granular (Toba Zoyatal o Aluvión Terciario), en el caso de pozos que extren agua de ambas unidades, se puede interpretar por medio de evidencias químicas y de pruebas de bombeo, como la mezcla de aguas que circulan en el medio fracturado y aguas que circulan en el medio granular, las primeras procedentes de un flujo profundo y las segundas debidas a un flujo intermedio más lento.

#### **Brechas volcánicas del Terciario Medio.**

Se designa así a las brechas volcánicas que sobreyacen a las ignimbritas, cuyos clastos son el producto de la fragmentación de estas últimas, como consecuencia de los procesos volcánicos que formaron las secuencias ignimbríticas presentes en la zona. Esta unidad aflora únicamente al sur de la zona de estudio, pero se desconocen sus características hidráulicas, ya que no existen piezómetros ni pozos que se avoquen exclusivamente a ella. Sin embargo, por la relación hidráulica que presenta con las rocas ignimbríticas subyacentes y por su génesis, se espera que estas podrían presentar condiciones hidráulicas favorables para su explotación, aunque limitadas, debido a la extensión lateral y vertical de esta unidad (ver secciones geológicas figuras III.4.2 y III.4.3).

explotación, aunque limitadas, debido a la extensión lateral y vertical de esta unidad (ver secciones geológicas figuras III.4.2 y III.4.3).

Su distribución es escasa, sin embargo en el subsuelo, se han encontrado horizontes brechoides de ignimbrita, que cubren a las ignimbritas (pozos Morelos 2, 3, 4, 5, 8, y PAB10 con espesores de 21, 74, 79, 41, 68 y 5 respectivamente; pozos Cumbres, Soyatal, SAA-1 PPGBA-3, PPBA-5 y pozo 93 con espesores de 22, 20, 8, 22, 16 y 50 respectivamente).

Su comportamiento hidrogeológico se espera que sea similar a las ignimbritas.

### **Toba Zoyatal**

De esta secuencia solo se observó una toba masiva compacta, con pequeñas cavernas, que en algunos sitios se presenta pseudoestratificada y muy fracturada tanto en sentido vertical como horizontal. Las fracturas verticales se encuentran rellenas de gel de sílice, mientras que las horizontales no.

El tamaño del material piroclástico en la toba es inferior a 4 mm. El espesor aflorante de esta toba es de 15 a 20 m.

Esta unidad se encuentra en el subsuelo descansando sobre la brecha volcánica, en algunos casos con espesores que alcanzan los 376 m (pozo Morelos 2).

Esta unidad es la más explotada en el área de estudio. Considerando las características arriba citadas, es posible encontrar sitios en que las fracturas actúen como barreras impermeables al flujo, y en otros que se comporten como conductos de flujo.

Por tratarse de material consolidado a semiconsolidado, es de esperarse un comportamiento similar al de un medio intergranular, sin embargo, la presencia de fracturas puede provocar que también se comporte como un medio fracturado, lo que lo hace un medio de doble porosidad en algunos sitios. La transmisividad obtenida en esta unidad se encuentra en el rango de  $0.09$  a  $1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

La presencia de material arcilloso en las fracturas, provoca que el medio presente heterogeneidades en ciertos lugares, que influyen en el comportamiento global del acuífero.

### **Aluvión del Terciario**

Son sedimentos compuestos por material tamaño arena, grava y limo-arenoso, semiconsolidado y no consolidado, que en algunas partes se encuentra parcialmente cementados con carbonatos y óxidos.

Afloran en la porción sudoriental del área y se distribuyen ampliamente en el subsuelo de la porción oriental. Los pozos que atraviesan esta unidad, reportan un espesor mínimo de 6 m (pozo 89) y máximo de 240 m (pozo PAB-26).

Debido a su aparente contemporaneidad con la Toba Zoyatal, se espera encontrar entre sus constituyentes principales, materiales de origen volcánico y vidrio.

no se conoce con precisión el comportamiento hidráulico de estos materiales. Sin embargo la prueba de bombeo realizada en el pozo Conejal el cual está perforado casi en su totalidad en este tipo de materiales, reporta un rango de transmisividades de 0.1 a 0.9  $\times 10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$  con un caudal de extracción de 5.77 l/s y un caudal específico de 0.00046  $\text{m}^2/\text{s}$

Por otra parte el pozo Calvillito 2, perforó un espesor de 100 m de Toba Zoyatal y 35 m de Aluvión del Terciario. Las transmisividades calculadas a partir de la prueba de bombeo en este pozo, van de 3.68 a 4.44  $\times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$

Debido a la naturaleza de estos depósitos se estima que pueden presentar una importantes heterogeneidades tanto verticales como horizontales. Se desconocen las condiciones en sus bordes.

### **Toba Aguascalientes**

En los afloramientos observados se identificó la siguiente secuencia:

En la base se presenta una toba lítica, poco consolidada. Sobre esta se encuentra una ceniza color blanco con espesores entre 0.30 y 4 m. Cubriendo a la ceniza blanca, se encuentra una toba poco consolidada interestratificada con material aluvial con espesores entre 20 y 25 m. En algunos sitios se encontró en su base una arenisca tobácea calcárea.

La secuencia descrita arriba es típica de la unidad, la cual forma un relieve de lomas redondeadas. En el subsuelo se identificó la presencia de esta unidad, la cual por su posición estratigráfica y espesor no se encuentra saturada de agua, sin embargo se espera que se comporte como un medio intergranular que puede favorecer la infiltración.

las heterogeneidades de esta unidad, son principalmente los cambios verticales debidos al tipo de depósito piroclástico que dió origen a la toba. Desde el punto de vista hidrogeológico, las cenizas blancas pueden actuar como una barrera a la infiltración. Lateralmente, las heterogeneidades más conspicuas son las que presenta la toba superior por su intercalación con paleocauces de aluvión, que pueden favorecer la circulación del agua en la zona no saturada.

### **Material Aluvial del Cuaternario**

El aluvión consiste principalmente de grava, arena, limo y arcilla. Se encuentra generalmente en los cauces de los arroyos y en las planicies donde presenta granulometría fina. Su papel hidrogeológico en algunos sitios de la porción oriental, se encuentra restringido a formar una capa superficial. Sin embargo en el Graben de Aguascalientes es el acuífero en explotación. Las transmisividades obtenidas en esta unidad se encuentran alrededor de  $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

### **Material Residual**

El material producto de la alteración de materiales volcánicos in situ, dadas sus características de arcillosidad, se espera presente comportamiento similar a los suelos, por lo que se considera de baja permeabilidad.

## **V.2 CENSO DE APROVECHAMIENTOS**

Para conocer las características generales e hidráulicas de los aprovechamientos existentes en el área de estudio, se llevo a cabo un censo físico de los mismos. Dicho censo se apoyó en la información recabada en la Secretaría de Obras Públicas, la Comisión Nacional del Agua y la Comisión del Agua Potable y Alcantarillado.

La información del censo se vació en el formato IAS-1 de la SARH ( anexo único- informe original).

Debido a que no existía un censo que tomara en cuenta todos los pozos de la zona y que los censos parciales que existen clasifican a los pozos con diferentes numeraciones y nombres, se propone en el presente trabajo una numeración simple la cual se representa en el Plano V.2.1. Su equivalencia con la nomenclatura preexistente se presenta en la tabla 5.2.1 .

En el censo se identificaron 170 aprovechamientos, ( ver Plano V.2.1 ) integrados por :

- 164 pozos con profundidades de 100 a 500 m. y diámetros de 8 a 20 pulgadas, de los cuales 95 perforan la secuencia volcánica y 69 están emplazados en el graben de Aguascalientes. Se dispone de 42 cortes litológicos de los pozos mencionados.

- Un pozo exploratorio perforado para PEMEX dentro de la secuencia volcánica, con una profundidad de 600 m. y cuyo corte litológico se tiene a disposición.

- 5 norias con profundidades de 7 a 12 m las cuales explotan los depósitos aluviales de los cauces principales.

De los 164 pozos perforados, 27 son de uso doméstico, 15 de uso industrial, 48 de uso agrícola, 62 de uso múltiple, 2 de uso recreativo y 13 se encuentran fuera de servicio.

Es necesario aclarar que además se ubicaron otros 5 aprovechamientos fuera del área mostrada por el Plano V.2.1, los cuales sirvieron para tener una mejor idea de las condiciones del subsuelo.

Del censo realizado, se estima que anualmente se extraen 55 Hm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos), de los cuales 31.7 Hm<sup>3</sup> son explotados en lomerío y 23.3 Hm<sup>3</sup> en la porción perteneciente al Valle de Aguascalientes

Nota : Durante la realización del Censo de Aprovechamientos, muchos pozos no se encontraban en funcionamiento, o bien estaban conectados directamente a la red de distribución de agua potable o a la red de riego, lo cual obligó a que se estimaran los caudales de extracción, basándose en los diámetros de las tuberías de salida y "suponiendo" que la descarga de agua es a tubo lleno, lo cual puede conducir a sobreestimar los volúmenes de extracción.

### V.3 PIEZOMETRIA

De los aprovechamientos censados se seleccionaron 36 pozos para constituir la red de monitoreo.

Se realizó una nivelación topográfica con un cubrimiento de 140 km para determinar la cota topográfica a la cual se encuentran los aprovechamientos.

Posteriormente se realizaron dos levantamientos piezométricos (ver Tabla 5.3.1), con el propósito de conocer mediante un análisis global de la morfología de la superficie piezométrica, la dirección del flujo subterráneo, las zonas de alimentación y drenaje y el funcionamiento hidráulico de algunas estructuras principales ( ver Plano V.3.1 ). De dicho análisis se concluye lo siguiente:

- La dirección del flujo subterráneo es preferencialmente de Este a Oeste.

- La falla del graben de Aguascalientes actúa como una barrera permeable a través de la cual el acuífero de la secuencia volcánica está alimentando al acuífero de los depósitos aluviales del graben.

- El gradiente hidráulico marca cuatro zonas principales:

1.- La zona A, ubicada al norte de los pozos 33 y 36 situados cerca de la desembocadura del arroyo Don Pascual y las Norias de Ojo Caliente respectivamente, en la cual dicho gradiente es de 0.1

2.- La zona B, situada al sur de la Presa El Cedazo y de Ojo de Agua de las Palmitas, tiene un gradiente de 0.07 ligeramente menor al de la zona A

3.- La zona C, situada en los alrededores del Cerrito La Cruz, posee gradientes de 0.015 los cuales son notablemente menores a los de la zona A y B.

4.- La zona D localizada al este de la isopieza 1890 presenta también una disminución en el gradiente hidráulico con respecto a las zonas A y B.

- La morfología de la superficie freática permite reconocer dos tipos de mantos freáticos de interés.

1.- Acuífero a manto freático radial divergente y perfil parabólico.

2.- Acuífero a manto freático radial convergente.

En el primero de este tipo de mantos ubicados dentro del área en los ejes de los arroyos Paso Hondo, El Cedazo y San Nicolas pueden estar asociados con áreas de recarga. De donde se comprueba que los cauces de los arroyos son zonas de recarga importantes para el acuífero.

El segundo tipo de mantos manifiesta la presencia de zonas de drenaje los cuales se ubican en los alrededores de la Presa Los Gringos y el Cerrito la Cruz.

#### **V.4 PRUEBAS DE BOMBEO**

##### **INTRODUCCION**

Con la finalidad de conocer el comportamiento hidráulico del acuífero, se realizaron 18 pruebas de bombeo y 9 pruebas de aforo.

De las pruebas de bombeo, 3 no se pudieron realizar por que los pozos presentaron problemas de sondeo. En 4 de las 9 pruebas de aforo, no se pudieron tomar datos, debido a que los pozos al iniciar la prueba de aforo, se encontraban mal desarrollados (las lecturas fluctuaban a caudal constante) y en lugar de llevarse a cabo una prueba de aforo, se estaban desarrollando los pozos. Otro de los problemas suscitados fué que el personal a cargo de los aforos no permitió que se tomaran datos. Por otro lado, se cuenta con información recabada de 2 pruebas de aforo en los pozos H. Nacozari y el Pozo No. 45 (15)<sup>5</sup>, la cual no es confiable debido a la metodología seguida por los operadores de los equipos de aforo. Dicha información no es interpretable.

La realización de las pruebas de bombeo se llevó a cabo en dos etapas. En la primera se realizaron 9 pruebas de bombeo, en los pozos Asturias (69), Calvillito 2 (98), Conejal (27), Cumbres (21), Chiflido (9), Hotel Panorama (66), Malacate (93), Morelos 5 (58), Morelos 6 (75) y Puertecito (3) y 3 pruebas de aforo en el Fraccionamiento Satélite-Morelos, en los pozos Morelos 4 (56), Morelos 5 (58) y Morelos 6 (78). En la segunda etapa se realizó una prueba de bombeo múltiple en el Fraccionamiento Ojo Caliente (ver plano V.4.1).

---

<sup>5</sup> ( ) Numeración de ETEISA

## **OBJETIVOS**

El principal objetivo de las pruebas de bombeo es determinar algunos parámetros hidráulicos del acuífero, tales como; permeabilidad transmisividad, coeficiente de almacenamiento y efectos laterales debido a la heterogeneidad del terreno. Lo que ayudará a conocer la geometría y características hidrodinámicas del sistema.

Por su parte las pruebas de aforo determinan la transmisividad puntual del acuífero, el gasto crítico, las pérdidas de carga y los abatimientos en función del gasto. Lo cual permite estimar el gasto óptimo al que debe explotarse un pozo.

El análisis conjunto de las pruebas de bombeo y de las pruebas de aforo, ayuda a conocer las condiciones de explotación a las que debe someterse un acuífero.

## **METODOLOGIA**

### **Primer etapa**

#### **Pruebas de Bombeo**

Se bombea a caudal constante (verificando frecuentemente la descarga), simultáneamente se inicia la lectura del descenso del nivel del agua, iniciando dichas lecturas en tiempos cortos y posteriormente se alargan los tiempos (que pueden ser preestablecidos o de acuerdo al criterio y experiencia del operador) hasta que el nivel dinámico (N.D.) llegue a su estabilización. La duración de las pruebas de bombeo estaba en función de las necesidades de los propietarios que colaboraron para su realización, así como el comportamiento de los niveles de agua durante el desarrollo de la prueba.

#### **Pruebas de Aforo**

Las pruebas de aforo se pueden realizar a escalón discontinuo y a escalón continuo.

Las pruebas de aforo a escalón discontinuo se inicia con el caudal  $Q_1$  más bajo que el equipo de aforo instalado sea capaz de sostener, el cual se mantiene hasta alcanzar la estabilización del nivel dinámico y una vez ocurrido esto se suspende el bombeo para tomar datos de lecturas de recuperación hasta llegar o casi llegar al nivel estático inicial, una vez recuperado el pozo (por lo menos un 80%), se inicia nuevamente el bombeo incrementando el caudal a  $Q_2$  ( $Q_2 > Q_1$ ) y se mantiene así hasta alcanzar la estabilidad del nivel de agua. Se continua este procedimiento hasta obtener información de un mínimo de 4 escalones.

Para la prueba de aforo en los pozos Morelos 4 (56) y Morelos 5 (58) se utilizó el Método del Escalón Discontinuo y para el pozo Morelos 6 (75) se inicio la prueba a escalón discontinuo y se finalizó a escalón continuo por falta de tiempo.

Las pruebas de aforo se llevaron a cabo una vez efectuado el desarrollo del pozo y recuperado el nivel estático por lo menos un 80%.

#### Segunda etapa

La segunda etapa de pruebas de bombeo se llevo a cabo con personal de cada una de las siguientes Dependencias: Secretaría de Obras Públicas (S.O.P), Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (C.A.P.A.), Comisión Nacional del Agua (C.N.A.) y Servicio de Agua de Aguascalientes S.A. (S.A.A.S.A), se formaron 12 brigadas integradas por 3 personas cada una. La prueba fué realizada en 11 pozos previamente seleccionados, cuya distribución se encuentra en el plano de ubicación de pozos en Ojo Caliente. Dichas pruebas se llevó a cabo del 8 al 11 de marzo de 1991. La prueba se realizó en 4 fases. La primera consistió en tomar lecturas de nivel dinámico (N.D.) y gasto (Q) en los pozos. Posteriormente se suspendió el bombeo de los pozos 91 (34), 95 (49), 21 (40) y 90 (41) debido a que, por su forma constructiva, no son sondeables, y por lo mismo hubo necesidad de retirar parte del equipo. A las 19:25 h del 8 de marzo de 1991 dejaron de operar los pozos 20 (47), 61 (48), 89 (44) y 92 (33) e inmediatamente se tomaron lecturas de recuperación durante 10:30 h.

Segunda fase.- Se tomó como pozo de bombeo al pozo 59-A (108-A), debido a que es el más céntrico de los pozos seleccionados y es uno de los que se extrae mayor caudal, además de que a 7.6 m de distancia se encuentra el pozo 59 que se utilizó como pozo de observación.

El pozo 59-A comenzó a funcionar a las 05:55 h del 9 de marzo. Durante la etapa de bombeo se estuvieron registrando variaciones del nivel de agua en los pozos de observación durante un lapso de 6 h. 30 min. A partir de las 12:25 h del 9 de marzo se inicia nuevamente el bombeo en los pozos 90 (41), 92 (33) y 89 (44) con una diferencia de 30 min. entre la operación de cada uno. En la tercera fase se reanuda el bombeo de los pozos 91 (34), 61 (48) y 21 (40) quedando los pozos 95 (49), 20 (47), 59 (108) y Bolerama (39) como pozos de observación. Tales pozos permanecieron con dicha función durante un lapso de 30.08 h. Este período se cumplió a las 20:00 h del 10 marzo. La cuarta y última fase consistió en parar el pozo principal de bombeo (59-A) (108-A) a las 20:00 h del 10 de marzo, habiendo permanecido en operación durante un tiempo de 39 h, en esta fase se le tomaron datos de recuperación y continuó la prueba en los pozos de observación durante las siguientes 14 h, en ese momento se termina la prueba ya que se reanuda el bombeo de los pozos restantes a las 10:00 h del 11 de marzo.

## **METODOLOGIA DEL ANALISIS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO**

Muchos tipos de rocas fracturadas tienen gran importancia como acuíferos. Sin embargo, las leyes macroscópicas y microscópicas del movimiento del agua en medios fracturados, son mal conocidas y han sido poco estudiadas.

A falta de herramientas mejores para el estudio del bombeo a caudal constante o de la recuperación, en estos medios se aplican las mismas fórmulas que se emplean en acuíferos granulares y homogéneos, principalmente Theis y Jacob, introduciendo los conceptos de límites de recarga y descarga, cambios laterales de propiedades, drenaje diferido, capacidad del pozo, descenso del espesor saturado, penetración parcial, etc.

La interpretación de las pruebas de bombeo en su etapa de abatimiento, fué realizada con base en el método simplificado de Jacob, para determinar la transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S), cuyas expresiones son:

$$T = \frac{0.183 Q}{s}$$

$$S = \frac{2.25 Q t T}{r^2}$$

donde:

- T= Transmisividad
- Q= Caudal de bombeo en m<sup>3</sup>/seg.
- s= Pendiente de la recta de ajuste en m/ciclo
- t= Tiempo en donde corta la recta
- r= Radio de la tubería
- S= Coeficiente de almacenamiento

Para la aplicación de este método, se utilizó la hipótesis de que el acuífero puede considerarse como homogéneo después de un largo período de bombeo.

Es conveniente aclarar que debido al hecho de no contar con pozos de observación en las pruebas de bombeo de la primera etapa, se utilizaron los abatimientos del mismo pozo de bombeo para los cálculos de Transmisividad (T), por tal motivo se consideran estos valores como puntuales de la zona influenciada por el pozo de bombeo.

Para la interpretación de las pruebas en su fase de recuperación, se aplicó el método de recuperación de Theis que sigue el mismo criterio del método anterior.

Así mismo, se realizó un análisis cualitativo de las gráficas ( $s/\log t$  y  $s'/\log t/t'$ ) para interpretar dentro de lo posible, algunas anomalías en el comportamiento de las curvas graficadas.

Cabe mencionar que la interpretación de dichas anomalías es enunciativa y no limitativa ya que no se cuenta con la suficiente información que permita determinar una sola causa.

Las transmisividades y coeficientes de almacenamiento calculados, se presentan en la tabla de resultados tabla V.4. La información de campo de cada una de las pruebas de bombeo se encuentran en el anexo 4.

## **RESULTADOS**

### **ANALISIS CUALITATIVO DE LOS POZOS**

#### **POZO NO. 20 (47)**

Las lecturas de recuperación en este pozo, iniciaron a las 19:25 horas del 8 de marzo, con una profundidad de 59 metros.

La recuperación en el pozo 20, continuó aún después de iniciado el bombeo en el pozo 59-A y en los pozos 91, 92, y 89, ubicados a 940, 900, 1320, y 875 metros del primero, respectivamente.

A las 16:25 p.m. del 9 de marzo, cuando se inició el bombeo simultáneo de los pozos 91, 61 y 21, ubicados a 1470, 650, y 720 metros del pozo 20, respectivamente; el pozo empieza a mostrar un ligero abatimiento, alcanzando una profundidad máxima de 58.025 m.

#### **ANALISIS DE LA GRAFICA DE ABATIMIENTO**

La gráfica de abatimiento (Fig. V.4.1 A) fué construída a partir de los valores observados en el pozo 20 al ser bombeado el pozo 59 A.

En la gráfica se aprecia que a pesar de los pequeños descensos registrados, no se logró llegar al estado de flujo permanente.

Los valores de transmisividad y los coeficientes de almacenamiento calculados se presentan en la tabla V.4

#### **ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION**

Como puede observarse en la gráfica de recuperación (Fig. V.4.1 B), las primeras 2.5 horas, no tienen datos graficados. Esto debido a que el pozo presentaba problemas de aceite, causando por ello, error en las lecturas.

TABLA V.4 TABLA DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO, AGUASCALIENTES

No. ETEISA	POZO	FUNCION	TRANSMISIVIDAD ETAPA DE RECUPERACION (m <sup>2</sup> /s)	TRANSMISIVIDAD ETAPA DE ABATIMIENTO (m <sup>2</sup> /s)	TRANSMISIVIDAD POR INFLUENCIA (10E-3) (m <sup>2</sup> /s)	Q (l/s)	NIVEL ESTATICO (m)	Q/S (m <sup>2</sup> /s)	OBSERVACIONES
47	20	P.O.	T1 6.90E-03		2.96E-02 3.74	17.00	57.79	0.0723	Presenta influencia en el abatimiento Se obtuvo transmisividad por influencia
40	21	P.B.5	T1 1.24E-02			95.00	53.06	-----	En este pozo se tuvo que remover el equipo de bombeo para poderlo hacer sondeable.
108	59	P.O.	T1 5.10E-01		4.63E-02 82	-----	56.69	-----	No presenta influencia del pozo 59-A, sin embargo al bombea los pozos restantes presentó influencia
108-A	59-A	P.B.1				110.00	56.63	0.001185	No esta bien desarrollado.
48	61	P.B.5				50.00	62.24	-----	Presenta graves problemas de aceite.
44	89	P.B.4	T1 6.23E-03	T1 6.64E-02		110.00	42.8	0.055	Este pozo se mostró fuertemente influenciado por el bombeo de los demas.
41	90	P.B.2	T1 4.66E-03			25.00	65.46	-----	Pozo no sondeable.
34	91	P.B.5	T1 7.59E-03	T1 7.27E-04		28.00	70.63	0.00252	Pozo que no presenta abatimiento cuando se bombean los demas.
33	92	P.B.3	T1 8.35E-03	T1 7.27E-03		120.00	67.29	0.0419	Presenta graves problemas de aceite.
49	95	P.B.6	T1 8.90E-03	T1 1.80E-04		28.50	92.2	0.00403	Presenta variaciones en el abatimiento y en la recuperación.
39	BOLERAMA P.O. BOLERAMA P.B.	T1 1.70E-02		T1 9.40E-03	3.38E-02 4.16	33.00	47.5	0.183	Se utilizó como pozo de observación durante la prueba de bombeo simultánea
69	ASTURIAS	T1 1.49E-04 T2 2.46E-04 T3 1.36E-03	T1 1.75E-04 T2 2.94E-04			13.43	115.015	0.00067	Se realizó prueba de bombeo sin pozo de observación
98	CALVILLITO # 2	T1 3.11E-05 T2 4.57E-05 T3 5.23E-04	T1 3.68E-05 T2 9.15E-05 T3 4.44E-04			8.00	45.59	0.000126	El pozo de observación Calvillito No.1 no presentó abatimiento durante la prueba
27	CONEJAL	T1 1.51E-04 T2 2.64E-04 T3 8.95E-04	T1 1.51E-04 T2 1.53E-04 T3 4.54E-04			5.77	74.45	0.00046	Se realizó prueba de bombeo sin pozo de observación
21	CUMBRES	T1 3.80E-03	T1 9.43E-04 T2 5.03E-03			33.00	126.18	0.00246	Se realizó prueba de bombeo sin pozo de observación
9	CHIFLIDO	T1 9.34E-05 T2 1.45E-04 T3 3.79E-04	T1 9.25E-05 T2 2.06E-04 T3 3.95E-04			10.36	93.415	0.000313	Se realizó prueba de bombeo sin pozo de observación

En la parte graficada, se observa que al ir disminuyendo el cono de abatimiento, varían los valores de T calculados a partir de la pendiente de los segmentos que unen los valores observados de abatimiento residual. Dichas variaciones pueden deberse a la heterogeneidad del medio o a la penetración parcial del pozo.

POZO No. 21 (40)

El pozo dejó de funcionar a las 17:55 h del 8 de marzo con la finalidad de quitarle algunas partes del equipo para poder introducir la sonda, por tal motivo las primeras lecturas fueron tomadas a las 1 h 56 min. después de su paro, y en ese momento la lectura de nivel del agua era de 53.83m.

Durante el bombeo de los pozos 59-A, 90, 92, y 89 ubicados a 390, 900, 670, y 860 m. respectivamente del pozo de observación (21), no se registraron lecturas de abatimiento en este último, lo cual indica que durante el tiempo en que se bombearon dichos pozos no alcanzó a observarse el radio de influencia. Cuando se reinició el bombeo de este pozo, no se tomaron datos de abatimiento por no ser sondeable.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION

En la curva de recuperación (Fig.V.4.2) se pueden apreciar tres fases importantes, sin embargo, una cuarta fase se perdió debido a que no se pudieron registrar lecturas de recuperación en las primeras horas de la prueba. Del análisis cualitativo de la gráfica se observa un comportamiento anómalo, ya que los valores de transmisividad más altos se registraron en la primera parte de la prueba, (extremo derecho de la gráfica) y las menores al final de esta. Lo anterior se cree que puede deberse a que el cono de influencia paso durante la etapa de abatimiento por un zona de alto fracturamiento con altos valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, y que durante la etapa de recuperación, el ascenso del nivel frático tuvo primero que saturar las cavidades vacías de las fracturas antes de fluir al pozo, tal efecto produce un retardo en el ascenso del nivel de agua.

En la segunda se observa un cambio en la pendiente en donde se registra un ascenso de 38 cm. en 13 h (Tabla V.4.2), en esta fase la transmisividad disminuye, esto puede indicar la presencia de un medio menos permeable que el anterior con varias capas o lentes de menor permeabilidad que ocasionan retardos en la recuperación. En la curva estos retardos se manifiestan como escalones. Al final se observa un nuevo cambio de permeabilidad, aunque menor que el anterior y un comportamiento más constante hasta la recuperación del que, para fines del estudio, se ha considerado como nivel estático.

TABLA V.4A

TABLA DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO, AGUASCALIENTES

No. ETEISA	POZO	FUNCION	TRANSMISIVIDAD ETAPA DE RECUPERACION (m <sup>2</sup> /s)	TRANSMISIVIDAD ETAPA DE ABATIMIENTO (m <sup>2</sup> /s)	TRANSMISIVIDAD POR INFLUENCIA (10E-3) (m <sup>2</sup> /s)	Q (l/s)	NIVEL ESTATICO (m)	Q/s (m <sup>2</sup> /s)	OBSERVACIONES
66	HOTEL PANORAMA	T1	3.02E-04	T1	1.52E-04	3.65	97.04	0.000714	El pozo de observación Granja Mandarina no presentó abatimiento durante la prueba
		T2	8.91E-04	T2	6.80E-04				
		T3		T3	3.18E-03				
93	MALACATE	T1		T1	1.64E-04	14.00	106.595	0.000517	No se tomaron datos en la etapa de recuperación por problemas de sonde
		T2		T2	2.56E-04				
		T3		T3	5.28E-04				
56	M-4	T1	7.94E-03	T1	8.06E-03	39.06	63.75	0.0102	Sus datos se obtuvieron antes de las pruebas de bombeo simultáneas.
58	MORELOS 5	T1	1.31E-03	T1	4.97E-04	45.06	77.46	0.00116	Se realizó la prueba de bombeo sin pozo de observación
		T2		T2	3.34E-03				
		T3		T3					
75	MORELOS 6	T1	1.63E-04	T1	1.47E-03	47.70	86.58	0.00101	Se realizó la prueba de bombeo sin pozo de observación
		T2		T2	4.36E-03				
		T3		T3	1.62E-02				
3	PUERTECITO	T1	5.93E-04	T1	5.44E-04	6.42	135.87	0.00105	Se realizó prueba de bombeo sin pozo de observación
53	S.E.P.	T1	4.45E-03			5.35	63.89	0.0382	Sus datos se obtuvieron antes de las pruebas de bombeo simultáneas.

POZO 59 (108)

Cuando inicia el bombeo del pozo 59-A a las 5:55 h del 9 de marzo, se inicia la observación del pozo 59, con una profundidad del nivel estático igual a 56.795 m. A las 12:20 h del mismo día, empieza el bombeo del pozo 90, 30 minutos después el del pozo 92, y media hora después el del pozo 89. Una hora más tarde, a las 14:20 p.m., comienza simultáneamente el bombeo de los pozos 91, 61, y 21, sin suspender el bombeo de los cuatro anteriores. Por lo tanto, durante la observación del pozo 59, se registraron tres etapas. La primera abarca el bombeo de los pozos 59-A, 90, 92 y 89, ubicados a 7.6, 588, 420 y 1240 m, del pozo 59, respectivamente. La segunda, comienza a partir de que inicia el bombeo simultáneo de los pozos 91, 61, y 21, ubicados a 872, 1304 y 380 m, del pozo de observación (59), respectivamente. La tercera se considera a partir de que se suspende el funcionamiento del pozo 59-A.

Es importante indicar que el interés que despierta este pozo es debido a que a pesar de la cercanía que tiene con el pozo principal de bombeo (59-A), no se presentó ninguna perturbación en el nivel durante el bombeo de dicho pozo quizá debido a una compartimentación del acuífero ocasionado por sistemas preferenciales de fracturas a través de las cuales circula el agua o que actúan como barreras semi permeables o impermeables. A partir de los datos se realizaron las gráficas (Fig. V.4.3 A y Fig. V.4.3 B), y se calcularon los parámetros de Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento, los cuales están indicados en la tabla V.4

De la gráfica de abatimiento, se observan que los puntos se alinean en dos rectas paralelas, separadas por un tramo donde los valores de abatimiento en función del tiempo representan una zona de mayor Transmisividad, probablemente una fractura saturada.

POZO 59-A (108-A)

Este fué el pozo principal de bombeo. Inicialmente se registró un N.E. de 56.63 m, su bombeo inició a las 05:55 hrs. del día 8 de marzo. Después de 39 h de funcionamiento se registró un abatimiento máximo de 92.795 m. Debido a las fluctuaciones que se presentaron durante el bombeo, se puede observar en la gráfica de abatimiento que los ascensos y descensos tienen un comportamiento anómalo, los cuales están asociados con un mal desarrollo del pozo, por tal motivo no se interpretó esta gráfica para obtener parámetros hidráulicos. El pozo dejó de funcionar a las 20:55 h del 10 de marzo, empezando en este momento la etapa de recuperación con una profundidad de 92.795 m., se observó que el pozo se recuperó a una profundidad de 33.56 m en 2 seg. superando en 23.07 m. al N.E. . A partir de esta profundidad empezó a abatirse hasta

llegar a un nivel de 57.245 m. a los 7 min. 29 seg., posteriormente presentó una recuperación gradual hasta llegar a un nivel de 56.97 m. después de 10 h 40 min. de haberse detenido el bombeo.

Se considera que las anomalías anteriores pueden estar asociadas con el mal desarrollo del pozo, aunado a la falta de una válvula chek, que impida el retorno del agua almacenada a la columna de bombeo. Lo que produjo que el nivel del agua ascendiese más allá del nivel estático registrado antes del inicio de la prueba y que posteriormente éste comenzará a abatirse y recuperarse hasta quedar en equilibrio con el nivel estático. (Fig. V.4.4 A y Fig. V.4.4 B)

#### POZO No. 61 (48)

Las lecturas de recuperación en este pozo se iniciaron a las 19:25 h del 8 de marzo, con un nivel de referencia de 65.43 m.. Se reinicia su bombeo a las 14:25 h del 9 de marzo. El comportamiento de éste pozo fué anómalo durante toda la prueba, debido a que el equipo de bombeo es lubricado con aceite, el cual forma sobre la columna de agua una interfase agua-aceite, y sobre esta una capa de aceite. Como se sabe, estos dos fluidos por tener diferentes densidades no se mezclan, pero pueden presentarse incluidos uno dentro del otro por la agitación que se efectuó en el pozo cuando fue bombeado. Este fenómeno provoca que al llegar la sonda a ésta interfase, se registren profundidades que no están representando el nivel real del agua, sino más bien las profundidades de las inclusiones de agua en el aceite, además de que el electrodo al estar impregnado de aceite, se bloquea y no marca el nivel de agua (aún encontrándose totalmente dentro ella) puesto que el aceite actúa como impermeabilizante. Todo esto produce, que la información que se obtenga de un pozo en tales condiciones no esté reflejando realmente el comportamiento de éste al ser bombeado. Es por tal motivo, que no se realizaron gráficas ni cálculos hidráulicos en este pozo.

#### POZO NO. 89 (44)

El pozo dejó de funcionar a las 17:25 h del 8 de marzo, en ese momento inició la etapa de recuperación y se tomó como punto de referencia un nivel de 43.23 m. para iniciar un período de observación de 10 h 30 min.. Al término de éste se registró una profundidad de 42.80 m. sin haberse alcanzado una estabilidad. Sin embargo, se tomó para fines prácticos esta profundidad como nivel estático. Después de 10 h 30 min. de recuperación se puso en operación el pozo principal de bombeo (59-A) ubicado a 1250 m del pozo 89. Esta operación inició a las 05:55 h del 9 de marzo, posteriormente a las 12:25 del

mismo día inició el bombeo del pozo 90, y 30 min. más tarde empieza el bombeo en el pozo 92, (estos pozos están ubicados a 1550 y 1450 m. del pozo 89, respectivamente). El Pozo 89 permaneció bajo vigilancia durante el transcurso del bombeo de los pozos, sin haberse registrado efecto alguno de abatimiento, por el contrario, el pozo seguía recuperándose, lo cual indica que no tuvo influencia de los pozos de bombeo. Esto pudo haber sido causado porque el tiempo no fuera suficiente como para apreciar alguna influencia en el pozo o bien por la distancia que hay entre los pozos de bombeo (59-A, 90 y 92) y el pozo mencionado. Se reanuda el bombeo a las 13:25 hrs. del 9 de marzo y 20 min. después se empiezan a tomar las lecturas de abatimiento, por lo tanto la primera parte de la etapa no se registró.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE ABATIMIENTO

Puesto que no se tomaron lecturas de abatimiento en los primeros 20 min. de la etapa, se perdió la primera parte de la gráfica (en la cual el descenso fué de 1.9 m.), por tal motivo se aprecian tan solo dos fases (Fig. V:4.5 A). En la primera se alcanza una estabilidad a 1.9 m. de abatimiento -durante las dos primeras horas-. Esta aparente estabilidad señala que puede haber una zona de mayor permeabilidad debido a que alrededor del pozo la zona es muy fracturada y con un buen coeficiente de almacenamiento. En la segunda fase se tiene un abatimiento de 10 cm en 6 h 30 min. de operación, posteriormente se mantiene este nivel hasta el final de la prueba. (Fig. 7.6 A) Los valores de Transmisividad y Coeficiente de almacenamiento calculados se presentan en la tabla V.4

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION

En la gráfica de recuperación (Fig.V.4.5.B) se puede observar una primera fase en donde no se registran ascensos. Este retardo en la recuperación puede estar indicando que la zona se encuentra muy fracturada y que al suspender el bombeo, el agua llena primero los espacios vacíos de las fracturas, para permitir después el ascenso del agua. Posteriormente se observa una segunda fase en la que a partir de los 43.17 m. empieza la recuperación. Se observa la presencia de un medio menos permeable que el anterior, en donde el nivel del agua asciende 25 cm. durante 5 h 25 min. En la tercer fase se observa un ascenso de 19 cm. en 8 h 45 min., cuyos retardos pueden estar indicando la presencia de lentes o fracturas poco permeables.

#### POZO No. 90 (41)

El Pozo dejó de funcionar a las 14:45 h del 8 de marzo con la finalidad de adaptarlo para poder introducir la sonda, por tal motivo no se tomaron lecturas de recuperación durante las primeras horas, solo se cuentan con datos a partir de las 05:05 hrs. del 9 de marzo, y un nivel de referencia de 65.64. Durante el bombeo del pozo 59-A, ubicado a 570 m. del pozo 90, no se registraron lecturas de abatimiento en este pozo, lo cual indica que el radio de influencia no le ocasionó abatimiento al pozo de observación, esto pudo haber sido por la distancia que hay entre los pozos o por el tiempo que no fué el suficiente para producir tal efecto. Tampoco se pudieron tomar lecturas de abatimiento por problemas de sondeo.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION

Debido a que no se tomaron datos al iniciar la etapa de recuperación, se perdió la primera parte de la gráfica y por tal motivo tan solo se aprecia la parte final (Fig. V.4.6). En dicha gráfica se observa un ascenso de 18 cm. en 9 h 22 min.

#### POZO No. 91 (34)

Este pozo fué parado antes de la hora indicada para hacerlo sondeable, debido a esto las lecturas de recuperación que en los demás pozos iniciarían poco después de las 19:25 hrs en este pozo iniciaron a las 16:45 hrs del 8 de marzo partiendo de un nivel de referencia de 80.85 m.

La recuperación en este pozo no se alteró con el bombeo del pozo 59-A el cual inició a las 5:55 h del 9 de marzo, ni con el de los pozos 90, 92 y 89 que empezó a las 12:20, 12:50 y 13:20 h del mismo día respectivamente.

La distancia de estos pozos con respecto al pozo 91 es de 830, 575, 975 y 1540 m en el orden mencionado.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE ABATIMIENTO

De la gráfica (Fig. V.4.7 A) se observa que los descensos en función del tiempo presentan períodos de estabilidad seguidos de fluctuaciones en los niveles. Lo anterior puede deberse al drenado de algunas fracturas ubicadas dentro de la zona de influencia.

La transmisividad calculada se presenta en la tabla V.4

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION

De la gráfica (Fig. V.4.7. B) se observa un comportamiento anómalo característico de varios de los pozos en la zona.

La transmisividad calculada se presenta en la tabla V.4

De la comparación de las transmisividades en abatimiento y en recuperación se aprecia que existe una diferencia de  $10^{-1}$  siendo menor la calculada durante la prueba de recuperación. La diferencia entre estas transmisividades puede deberse a las pérdidas de carga en el pozo durante el bombeo.

#### POZO No. 92 (33)

Se paró a las 19:25 h del 8 de marzo. La profundidad del nivel dinámico registrado antes del inicio de la prueba de recuperación fué de 70.57 m.

El pozo esta lubricado por aceite, lo que dificultó el monitoreo del nivel dinámico durante la prueba de abatimiento y recuperación.

Con los datos recolectados se realizaron las gráficas de abatimiento y recuperación (Fig. V.4.8 A y Fig. V.4.8 B)

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE ABATIMIENTO

De la gráfica se observa que los puntos se semialinean en torno a la recta  $T_1$  de cuya pendiente se calculó un valor de transmisividad de  $7.27 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  el cual es ligeramente menor al calculado en la etapa de recuperación, la diferencia entre ambos valores puede deberse a pérdidas de carga en el pozo ocasionadas en la etapa de bombeo.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION

De la tabla V.4.8, se aprecia que el pozo tuvo una recuperación total de 2.59 m, durante el periodo de monitoreo. Dicha recuperación se dió en tres etapas. En la primera etapa, las observaciones del nivel dinámico en función del tiempo se alinean en torno a la recta  $T_1$  de cuya pendiente se calculó un valor de transmisividad de  $8.35 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ .

La segunda etapa la representa un período de estabilidad. Dicho período de estabilidad puede ser debido al ir disminuyendo el área del cono de abatimiento, éste pasa por zonas fracturadas las cuales fueron drenadas durante la etapa de bombeo, lo que ocasiona que el agua primero debe saturar los espacios vacíos de las fracturas, antes de que el nivel puede seguir ascendiendo.

Esta hipótesis se basa en que el pozo está emplazado en un acuífero de rocas fracturadas las cuales poseen valores altos de coeficiente de almacenamiento, un alto grado de fracturación (ver análisis geológico-estructural)

#### POZO No. 95 (49)

El bombeo en este pozo se interrumpio a las 15:30 hrs. del 8 de marzo debido a las maniobras técnicas para poder introducir la sonda, las lecturas de recuperación iniciaron a las 16:45 hrs. a partir del nivel de referencia de 92.70 m de profundidad del nivel freático. Durante 1 h 50 min. se tomaron lecturas continuas, registrando, una profundidad del nivel de agua de recuperación hasta ese momento de 92.48 m., después interrumpieron las lecturas para esperar el tiempo indicado al paro general de los pozos a las 19:25 h del 8 de marzo, a partir del cual en todos se iniciaron lecturas de niveles de recuperación.

La recuperación en este pozo fué constante y no se afecto por bombeo en el pozo 59-A iniciado a las 5:55 hrs. del 9 de marzo ni por el de los pozos 90, 92 y 89 iniciado a las 12:25, 12:55 y 13:25 hrs. respectivamente del mismo día, estos pozos se encuentran ubicados a 1260, 720, 1590 y 2120 m del pozo analizado en el orden indicado.

A las 14:25 hrs. del 9 de marzo se reinicio el bombeo en los pozos 91, 61 y 21 ubicados a 900, 840 y 1485 m teniendo monitoreados los pozos 20, 59, 95 y Bolerama, a partir de este momento el pozo se continuó observado durante 3 h 40 min, entonces se interrumpieron las lecturas para colocar nuevamente el equipo de bombeo.

El bombeo se reinicio a las 19:11 hrs. del 9 de marzo con un nivel de referencia de 92.20 m. A los 30 segundos tuvo un abatimiento máximo de 7.08 m. llegando así a los 99.28 m. de profundidad. Después, el nivel empezó a recuperarse, ésta recuperación fué constante durante 2 hrs. llegando a un nivel de 97.35 m. Posteriormente el pozo ya no fué observado teniendo como tiempo total de observación 28 h 16 m. (Fig. V.4.9 A y Fig. V.4.9 B)

#### POZO BOLERAMA (39)

Las lecturas de recuperación en éste pozo iniciaron a las 17:25 h del 8 de marzo, con un nivel de referencia de 48.0 m. La recuperación es continua a pesar del bombeo del pozo 59-A que inicio a las 5:55 h del 9 de marzo y del bombeo de los pozos 90, 92 y 89 que empezó a las 12:20 h, con intervalo de 30 minutos entre el arranque respectivo a cada uno. La distancia

de estos pozos al Bolerama es de 750, 1080, 940 y 540 m respectivamente. Posteriormente a las 14:25 h se reanudó el bombeo simultáneo en los pozos 91, 61 y 21 ubicados a 1540, 1315 y 325 m del pozo en cuestión. Es al inicio del bombeo simultáneo, cuando en este pozo se empezó a registrar abatimiento. El abatimiento máximo registrado por influencia fue de 60 cm. Después de 63 h 42 m de observar éste pozo se reanudó su funcionamiento, aprovechándolo para realizar una pequeña prueba de bombeo cuya duración fue de 25 minutos.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE ABATIMIENTO (Como pozo de Observación)

En la gráfica (Fig. V.4.10 A) se observa que los puntos se alinean al rededor de una recta, de cuya pendiente se calculó un valor de transmisividad de  $3.38 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  y un coeficiente de almacenamiento de 0.00416 ambos valores son representativos de un acuífero de buen potencial.

Por otra parte, si se observa más detalladamente la citada gráfica se puede notar que los puntos se alinean en tres segmentos de recta de los cuales, el primero y el tercero son paralelos. Lo anterior puede deberse a un efecto por el fracturamiento de las rocas riolíticas en la zona.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE RECUPERACION

En esta gráfica (Fig. V.4.10 B) se observa que en la primera parte (de izquierda a derecha) los puntos presentan un orden caótico debido probablemente a la heterogeneidad del medio o a problemas de lectura, en la segunda parte los puntos se alinean en la recta  $T_1$ , a partir de la cual se calculó un valor de transmisividad de  $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . Este valor es ligeramente mayor al calculado de la gráfica de abatimiento (como pozo de bombeo), sin embargo esto se debe a que los valores de transmisividad calculado de la gráfica de abatimiento representan transmisividades puntuales, las cuales fueron obtenidas a partir de las descensos en función del tiempo durante la etapa de bombeo en el mismo pozo y los valores calculados de la gráfica de recuperación representan las transmisividades del acuífero en la zona afectada por el bombeo y en dirección al pozo de observación.

#### ANALISIS DE LA GRAFICA DE ABATIMIENTO (Como pozo de Bombeo)

De la gráfica (Fig. V.4.10 C) se observa que a los 2 minutos de iniciado el bombeo se alcanzan las condiciones de equilibrio. De la primera parte de la gráfica se calculó un valor de transmisividad de  $9.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### POZO CONEJAL (27)

Las figuras V.4.13 A y V.4.13 B muestran las curvas de abatimiento y recuperación en función del logaritmo del tiempo, registradas en el pozo El Conejal (anexo I. Tabla V..13).

La tabla 5 muestra los valores de Transmisividad calculados en abatimiento y recuperación.

En la primer parte de la curva de abatimiento se observa el posible efecto de la penetración parcial del pozo en el acuífero.

De la comparación de las transmisividades en abatimiento y recuperación se determina que no existen pérdidas de carga significativas en el pozo y que el gasto de extracción se encuentra en equilibrio con el acuífero.

#### POZO PUERTECITO

La figuras V.4..21 A y 5.21 B muestran las curvas  $s$ -log  $t$  y  $s$ -log  $t/t'$

Las transmisividades calculadas en abatimiento ( $T$ ) y en recuperación ( $T'$ ) se presentan en la tabla 5.

En la primera parte de la curva de abatimiento se observa el probable efecto de la penetración parcial del pozo, sin embargo la comparación de las transmisividades calculadas durante el abatimiento y la recuperación indican que no existen pérdidas de carga significativas u que el gasto de extracción está en equilibrio con las características hidráulicas del acuífero.

#### PRUEBA DE AFORO POZO MORELOS 4

##### Curva Característica

La curva característica del pozo (fig.V.4.18 B, anexo 4 ) muestra la forma típica de un acuífero libre con una inflexión entre 40 y 45 l/s en la cual se define un gasto crítico. Se recomienda explotar este pozo a un gaso no mayor a 40 l/s.

##### Curva de Caudal Específico

La curva de abatimiento ( $s$ ) en función del gasto específico ( $Q/s$ ) fig V.4.18 C (anexo 4) muestra dos segmentos de recta. El primero pudiese estar representando un efecto de desarrollo, el segundo representa la permeabilidad del acuífero en la zona cercana al pozo.

### Transmisividades

La figura V.4.18.A (anexo 4) muestra una curva de abatimiento en función del tiempo muy perturbada con aumentos y descensos en las pendientes de las rectas que unen los puntos. Lo anterior puede deberse al paso del cono de abatimiento en zonas de diferentes permeabilidades. La transmisividad calculada a partir de la recta  $T_1$  es de  $7.49 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### PRUEBA DE AFORO POZO MORELOS 5

Curva característica y de Caudal Específico.

Tanto la curva característica (fig. V.4.19.D) como la de caudal específico (fig. 4.19.C) muestran la forma típica de un acuífero confinado. Lo cual se confirma con el análisis del corte litológico de este pozo en el cual se reporto un espesor de 180 m de una ceniza blanca la cual esta actuando como confinante.

No se logro obtener con exactitud el gasto crítico ya que la potencia del equipo utilizado no fué suficiente y por ende el gasto óptimo de explotación no se puede determinar con exactitud. Se recomienda realizar la prueba con un equipo más potente.

### Transmisividad

De las figuras V.4.19.A. y V.4.19.B se calcularon las transmisividades en abatimiento y recuperación. Los valores calculados se presentan en la tabla V.4.

### PRUEBA DE AFORO POZO MORELOS 6

Curva Característica y de Caudal Específico

Tanto la curva característica fig. V.4.20.C como la de caudal específico fig V.4.20.D muestran la forma típica de un acuífero libre. En la curva curva característica no se logra apreciar un gasto crítico, por lo que el gasto óptimo puede ser mayor a 49 l/s. Se recomienda realizar nuevamente la prueba con un equipo de mayor potencia.

### PLANO DE ISOTRANSMISIVIDADES

El Plano V.4.1 fué elaborado con base en las pruebas de bombeo realizadas durante el presente estudio. Las transmisividades se calcularon con las gráficas de las etapas de recuperación de los pozos.

La configuración de las curvas de isotransmisividad muestra que :

- 1) Los mayores valores de transmisividad se encuentran en la zona de Ojo Caliente, siendo el valor más grande de  $62.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  para el aprovechamiento 89, ubicado dentro del Parque IV Centenario .
- 2) Los valores de transmisividad disminuyen gradualmente hacia el este reportándose el valor más pequeño en el Pozo Asturias (Aprovechamiento N° 69).

#### **DESCRIPCION DEL PLANO DE UBICACION DE POZOS EN OJO CALIENTE**

El Plano V.4.1 muestra la localización de los 10 pozos que se monitorearon durante las Pruebas de Bombeo Simultáneas en Ojo Caliente ( Ciudad de Aguascalientes ) con 49.5 horas de duración efectiva ( 10.5 horas de reposo y 39 horas de bombeo continuo ). Los pozos monitoreados fueron 39 (Bolerama), 47 (CAPA 20), 108 (CAPA 59), 108-A (CAPA 59-A), 48 (CAPA 61), 44 (CAPA 89), 41 (CAPA 90), 34 (CAPA 91), 33 (CAPA 92) y 49 (CAPA 95). Además se suspendió el bombeo del pozo 18 y los localizados en los balnearios de Ojo Caliente.

#### **DESCRIPCION DEL PLANO DE ISOPIEZAS EN OJO CALIENTE**

El Plano V.4.2 fué elaborado en base a las profundidades de nivel freático registradas el día 9 de marzo de 1991, después de 10.5 horas de haberse suspendido el bombeo en todos los pozos de la zona.

De la configuración de los datos se obtuvieron curvas isopiezas, que para fines prácticos se consideraron como representativas del nivel estático.

De la distribución de dichas curvas se observa que :

- 1) Estas manifiestan la presencia de un cono de abatimiento cuyo centro se localiza en las proximidades del Pozo 20. Es conveniente señalar que la ubicación de dicho cono no está directamente relacionado ni con el gasto de extracción del pozo, ni con el tiempo de bombeo, ya que es uno de los que presenta menor gasto y funciona al igual que otros la mayor parte del día.

Es probable que la ubicación del cono se deba a una diferencia en las velocidades de recuperación, ocasionada por las distintas permeabilidades en la zona.

- 2) En el extremo norte se incrementa fuertemente el gradiente hidráulico y la dirección del flujo subterráneo se invierte, obteniendo nuevamente la dirección preferencial de flujo. (ver plano de piezometría V.3.1).

#### **DESCRIPCION DEL PLANO DE CURVAS DE IGUAL NIVEL DINAMICO EN OJO CALIENTE**

El Plano V.4.3 de Curvas de Igual Nivel Dinámico fué elaborado de acuerdo a los niveles dinámicos registrados durante las Pruebas de Bombeo Simultáneas ( realizadas en el periodo del 8 al 11 de marzo de 1991) a las 39 horas de haber reanudado el bombeo de los pozos .

La configuración de las curvas de isoniveles dinámicos permite ver un cono de abatimiento, cuyos abatimientos máximos se localizan en el Pozo 59-A, el cual es un comportamiento esperado ya que este pozo fue el primero en ponerse a funcionar durante la prueba de bombeo simultaneo. Dicho cono creció predominantemente hacia la porción sur del área debido probablemente a un descenso de la permeabilidad en esta dirección

Algunas observaciones interesantes se pueden apreciar al sobreponer el plano de isopiezas del nivel estático con el plano de curvas de nivel dinámico . Dichas observaciones son:

- 1.- El pozo 59-A presenta un abatimiento de 36 m
- 2.- El pozo 61 ubicado al sureste del pozo 59A a una distancia aproximada de 1300 m presenta un abatimiento de 7 m
- 3.- El pozo 92 localizado al norte del pozo 59A a una distancia de aproximadamente 400 m presenta un abatimiento de 3 m

Lo anterior indica que los abatimientos provocados por el bombeo disminuyen fuertemente hacia el norte del pozo 59A y aumentan hacia el sur. Esto probablemente se deba a una diferencia significativa en las transmisividades del acuífero (ver plano V.4.6 Isotransmisividades) debido a la presencia de las rocas ignimbríticas en los alrededores de los pozos 59A,92,89,Bolerama y la presencia de tobas en la zona de los pozos 61, 20, SEP.

#### **DESCRIPCION DEL PLANO DE CURVAS DE ISOTRANSMISIVIDADES EN OJO CALIENTE**

El Plano V.4.5 fué elaborado en base a las Pruebas de Bombeo Simultáneas realizadas en el período comprendido entre los días 8 y 11 de marzo de 1991. Las transmisividades mostradas fueron calculadas con las gráficas de recuperación de los pozos. Los

datos de transmisividad de cada pozo se utilizaron para configurar las Curvas de Isotransmisividad, de las cuales se observa :

- 1) Las mas altas transmisividades se encuentran en los alrededores de los pozos 20, Bolerama, 59-A y 89 (parque IV Ceñtenario ), siendo la de este último la de mayor valor ( $62.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  ).
- 2) Se aprecia un descenso en las transmisividades hacia las zonas limítrofes de Ojo Caliente, detectandose la transmisividad más baja hacia el Pozo S.E.P. con  $4.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### **COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO**

Se pudieron calcular los coeficientes de almacenamiento en los pozos 59, Bolerama y 20, siendo los valores obtenidos de  $82 \times 10^{-3}$  ,  $4.16 \times 10^{-3}$  y  $3.74 \times 10^{-3}$  respectivamente .

#### **DESCRIPCION DEL PLANO DE CURVAS DE IGUAL CAUDAL ESPECIFICO EN OJO CALIENTE**

El Plano V.4.4 de Curvas de Igual Caudal Específico "q" fué configurado en base a los valores de caudales y abatimientos máximos ( de acuerdo a la definición del caudal específico  $q=Q/a$ ) obtenidos en las Pruebas de Bombeo Simultáneas, después de 39 horas de reanudado el bombeo en los pozos.

De las Curvas de Igual Caudal Específico se observa :

- 1) Los caudales específicos mayores pertenecen a los pozos localizados en la zona oeste de Ojo Caliente ( pozos Bolerama, 20 y 89 ).
- 2) Los caudales específicos menores se ubican en la porción Este de Ojo Caliente, correspondiendo al pozo 91 el mínimo valor con  $0.252 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s/m}$ .

TABLA VI.-1  
RELACION ENTRE CADA POZO Y SU NO. DE MUESTRA PARA ANALISIS FISICOQUIMICO  
ASI COMO LA LITOLOGIA DE LOS POZOS QUE CUENTAN CON INFORMACION.

MUESTRA NO.	NOMBRE DEL POZO	NO. DE E.T.E.I.S.A.	LITOLOGIA EN m DE CADA FORMACION	RANURADO
1	MORELOS 3	64	28 Ta, 268 Tz, 74 Bv	130 Tz, 74 Bv
3	HELENAS	84		
4	VIOLETAS	116		
5	PUERTECITO	3		
6	MORELOS 4	56	246 Tz, 76 Bv, 82 Ign	Bv, Ign
7	PANORAMA	66		
8	ASTURIAS	69		
9	MALACATE	93		
10	CALVILLITO 1	99	64 Ta, 206 Tz	Tz
11	CALVILLITO 2	98	40 Ta, 208 Tz, 60 Bv	68 Tz, Bv
12	POZO DE GATO	138		Tz
14	CUERVOS	171		
15	CUMBRES	21	306 Tz, 22 Bv, 82 Ign	163 Tz, Bv, Ig
16	COBANO	18	300 Qal	Qal
17	SN. ANTONIO	7		
18	CONEJAL	27	20 Ta, 80 Tz, 149 Cg	
19	N. OJO CALIENTE	36		
20	POZO COBOS	95		177 Tz, Ign
21	CHIFLIDO	9		
22	CENTENARIO	44	294 Ign	Ign
23	POZO 92	33	30 Ta, 133 Tz, 119 Ign	13 Tz, Ign

Qal---ALUVION  
Ta---TOBA AGUASCALIENTES  
Tz---TOBA ZOYATAL  
Bv---BRECHA VOLCANICA

Ign---MATERIAL ALUVIAL DEL TERCARIO  
Ign---IGNIMBRITA

Simbologia:

VI.—H I D R O G E O Q U I M I C A

## **VI HIDROGEOQUIMICA**

### **VI.I INTRODUCCION**

La vida en la Tierra depende del agua. Es indispensable tanto para los procesos vitales como para muchos otros propósitos tales como irrigación, industria, transporte, dispositivos de desecho, etc.

También el agua como parte esencial de la geología juega un papel muy importante en el ciclo de las rocas. El agua de lluvia convierte continentes de rocas graníticas en arcillas, arenas y solutos, transportándolos al Océano donde se convierten en la materia prima de la futura corteza terrestre.

Considerando pues, el rol tan importante que el agua juega en la vida humana y en la ciencia geológica, es fundamental conocer los procesos que determinan su química.

La química de las aguas subterráneas fué inicialmente estudiada, en relación a su disponibilidad para propósitos de uso. Sin embargo, conforme el conocimiento global del agua subterránea ha aumentado, sus aspectos hidroquímicos han logrado ser interpretados con respecto a los procesos de evolución química y criterios de calidad.

El crecimiento demográfico ha provocado diversos problemas ambientales y sobre los sistemas acuíferos también, razón por la cual los estudios relativos a la contaminación han cobrado mucha importancia.

En cuanto a la utilidad de este conocimiento, los constituyentes químicos y bioquímicos en el agua subterránea determinan sus usos para la industria, agricultura y consumo humano. Los constituyentes disueltos en el agua subterránea proveen indicios importantes respecto a su historia geológica, su tiempo de permanencia en el suelo o masas rocosas a través de las cuales ha pasado, la presencia de yacimientos minerales ocultos, y su procedencia dentro del ciclo hidrológico. Los procesos químicos dentro de la zona acuífera pueden influir la consistencia de los materiales geológicos y en situaciones donde no es reconocida puede ocasionar fallamientos u otros problemas en taludes, presas, obras mineras, etc.

Por otra parte, con los estudios hidrogeoquímicos se puede contribuir a definir, hasta cierto punto, los límites de diferentes zonas acuíferas, la dirección de flujo, así como ciertas condiciones estructurales que influyen la dinámica del flujo en el acuífero tales como fracturas, fallas, etc.

Para realizar un trabajo hidrogeoquímico se requiere contar con el análisis físico químico de las muestras de agua de los aprovechamientos que se consideren representativos en el área de estudio. Con este propósito, se realizó en la zona de interés,

un muestreo de los aprovechamientos para sus correspondientes análisis de Laboratorio y los resultados del mismo se interpretan en este Capítulo.

## **VI.2 LOCALIZACION Y GENERALIDADES DEL MUESTREO**

Se tomaron muestras de agua de 23 aprovechamientos, entre los cuales 22 son pozos y uno (muestra no. 13) manantial. Sin embargo, la muestra No. 2 no será tomada en cuenta para el análisis hidrogeoquímico debido a que del análisis en laboratorio se encontró contaminada con tierra; y en cuanto a la muestra del manantial se refiere, esta se tomó con fines comparativos y no aparece cartografiada debido a que se encuentra fuera del área de estudio.

La localización de los pozos a que corresponde cada muestra, se presenta en el plano VI.1, y se hará referencia a estos mediante su número de muestra, o mediante el nombre del pozo. Para ello, se presenta a continuación una tabla (Tabla VI.1), donde se indica el nombre del pozo y su número asignado por E.T.E.I.S.A., así como el número de muestra que le corresponde. Además, en la misma tabla, se presenta la litología de cada pozo, en los casos en que se halla contado con el corte litológico del mismo, así como los espesores encontrados de cada unidad de roca y la zona donde se encuentra el ranurado del ademe.

### **VI.3 CLASIFICACION DEL AGUA Y FACIES HIDROGEOQUIMICAS**

El concepto de facies hidrogeoquímicas fué desarrollado por Back, Seaber, Morgan y Winner entre 1961 y 1962 ( Freeze & Cherry, 1979) y es una paráfrasis de la definición de facies empleada en las rocas, "facies es el conjunto de partes identificables de distinta naturaleza pertenecientes a un cuerpo o sistema genéticamente relacionado". La facies hidrogeoquímica, es una zona que tiene concentraciones de aniones y cationes las cuales es posible identificar como pertenecientes a categorías composicionales definidas.

En el presente Estudio se consideró para clasificar al agua subterránea, el criterio de Facies Hidrogeoquímicas por ser el más aceptado y práctico en la actualidad, además de ser sus gráficas las que mejor pueden ilustrar el comportamiento geoquímico del agua tanto en diagramas (Piper, Back), como en Mapas Hidrogeoquímicos (Stiff), permitiendo adicionalmente apreciar la evolución química del agua subterránea en caso de que exista (Durov, Stiff).

#### **Diagrama de Piper (Fig. VI.1)**

El empleo de los diagramas triangulares fué iniciado por Hill (1940) y modificado por Piper (1944). Este último ha sido empleado tradicionalmente y como se muestra en la figura VI.2, los iones principales se grafican en los dos triángulos base del diagrama como porcentajes de aniones y cationes (referidos al 100% de cada uno de estos últimos ) en miliequivalentes por litro.

Este diagrama permite comparar un gran número de muestras. Las desventajas de este tipo de diagramas es que no indican la concentración real de las muestras, y la distribución de los iones dentro del campo romboedral no es sistemática en términos de procesos hidroquímicos de modo que el diagrama carece de cierta lógica (Lloyd, 1985). Sin embargo, las subdivisiones propuestas por Back en 1961, para sobreponerlas en este diagrama son el principio del concepto de facies hidrogeoquímicas que, aunada al conocimiento del ambiente geológico, pretende lograr una interpretación más completa y con un enfoque más científico

En la figura VI.1 se observa que, los cationes se agrupan en general en la porción media del Triángulo y se extienden hacia el tipo cálcico sin alcanzar el 60%, es decir que su límite izquierdo se halla entre el 50 y 60 % de calcio.



# ESTUDIOS Y TECNICAS ESPECIALIZADAS EN INGENIERIA, S. A. DE C. V.

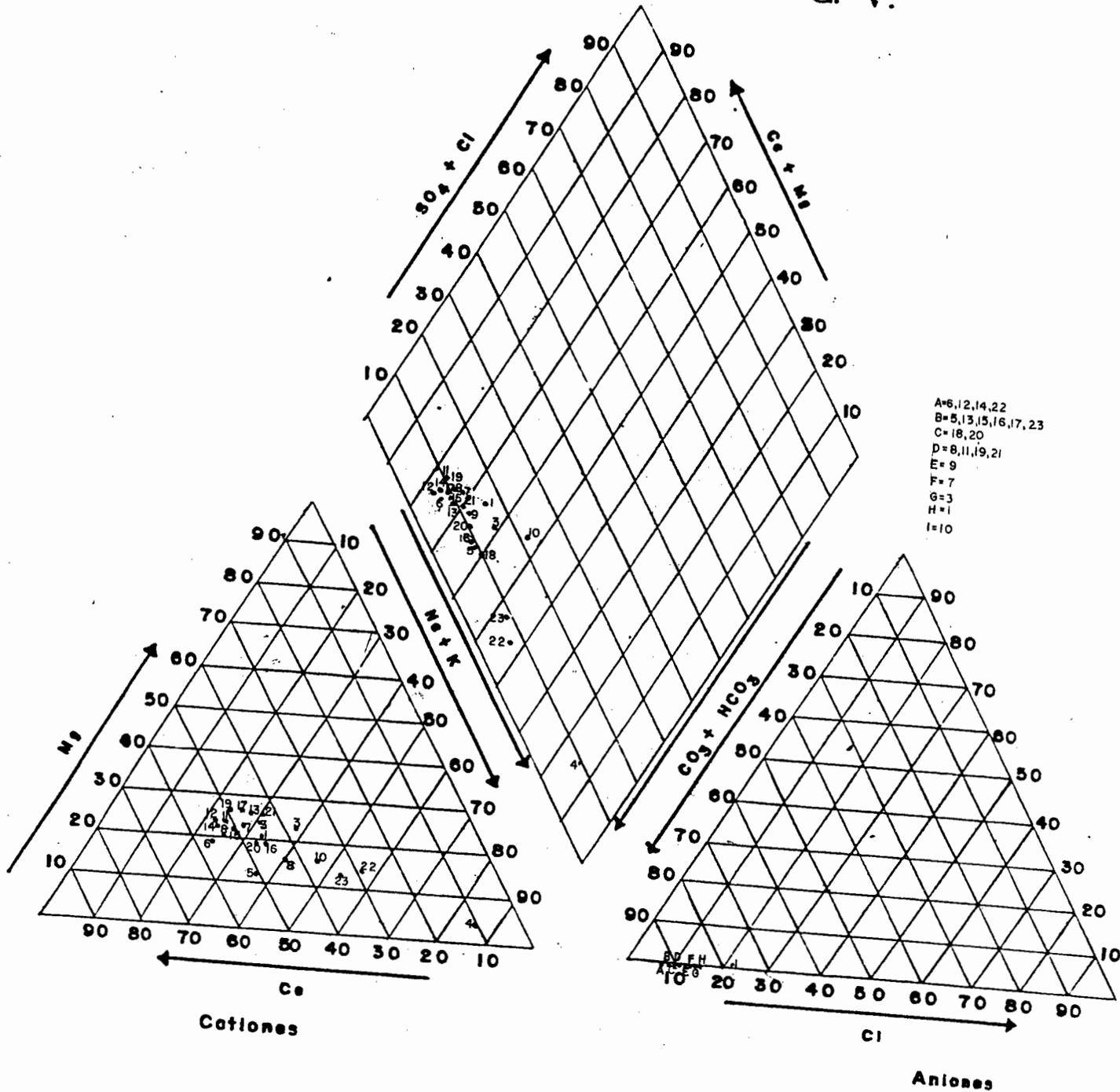


Fig.VI.1 Análisis Químicos de agua representados como porcentaje de meq/l. (Piper, 1944)

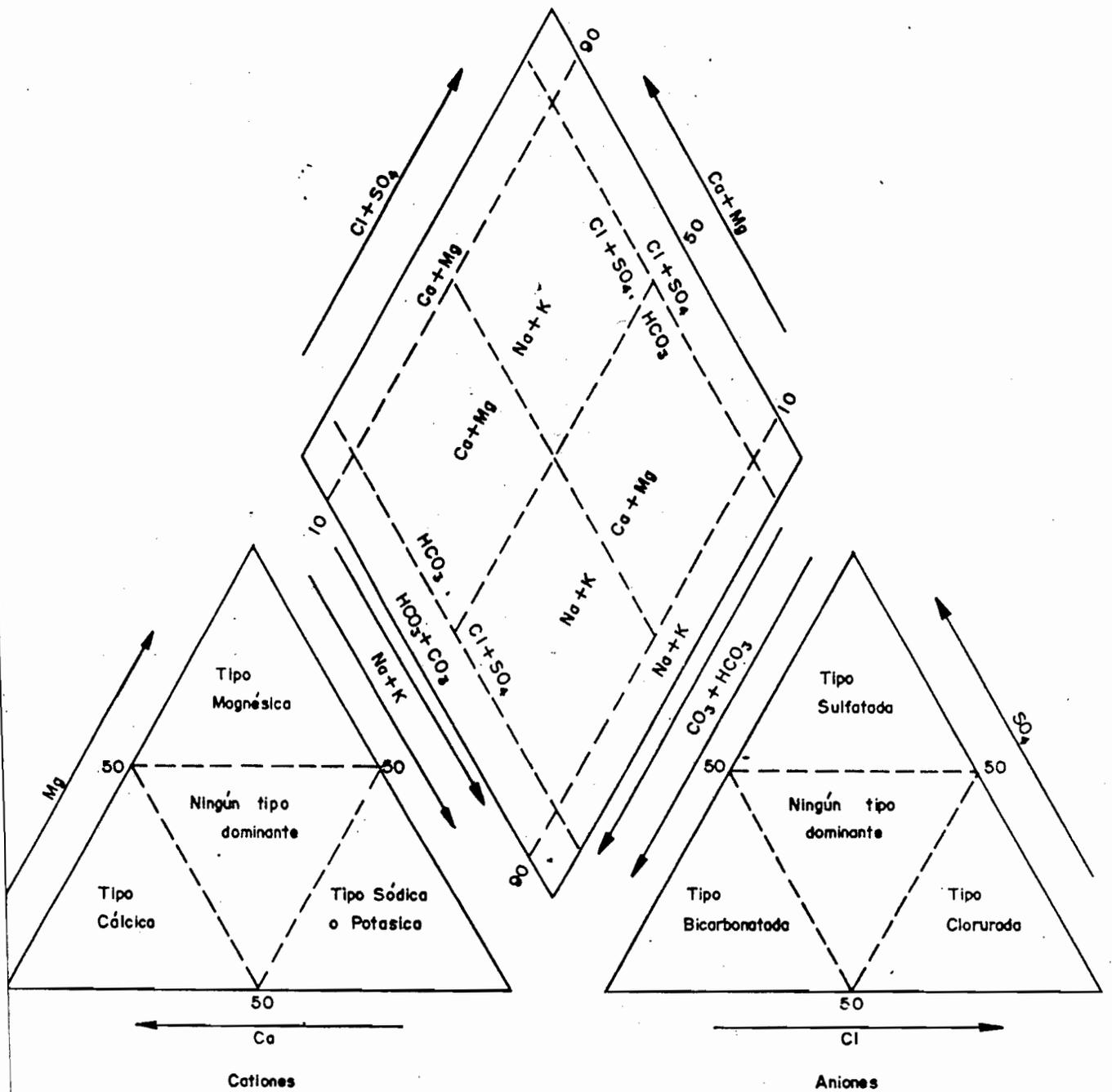


Fig VI. I  
 Division de Facies Hidrogeoquímicas  
 propuestas por Bock en 1962.

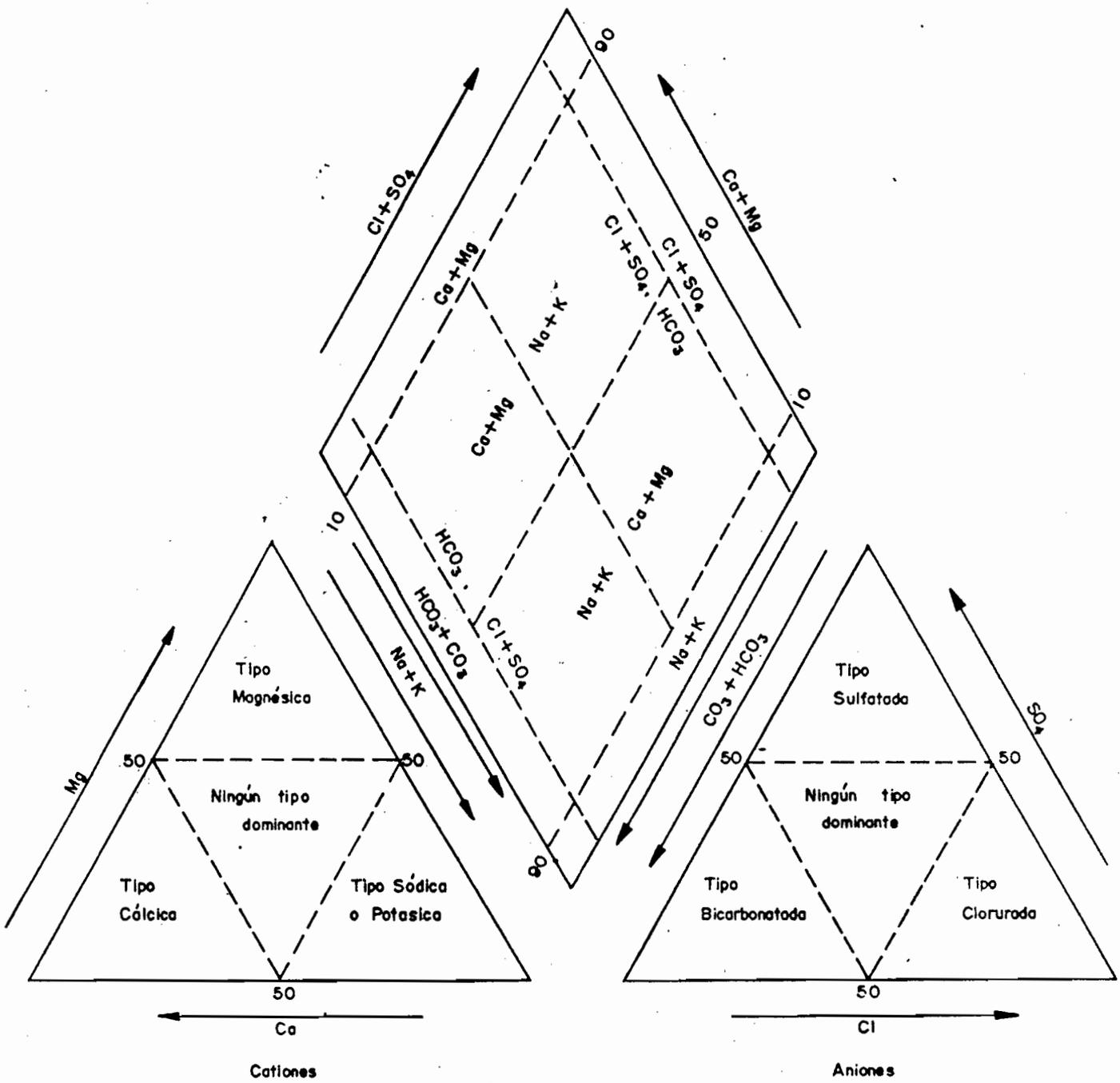


Fig VI. 1  
 Division de Facies Hidrogeoquímicas  
 propuestas por Back en 1962.

A continuación se describen los tres grupos observados en el triángulo correspondiente a los cationes.

A) Las muestras que caen dentro del dominio cálcico (aunque muy cerca del límite inferior) son la 15 (52.17 % de Ca), la 14 (54.47%), la 12 (54.29 %), la 11 (51.29%), la 8 (53.78 %) y la 6 (55.04 %). La característica común a las 6 muestras es la de pertenecer a pozos perforados a través de la toba Zoyatal en sus tres cuartas partes y a través de la Ignimbrita en su base, constituyendo esta última aprox. 1/4 de la profundidad total del pozo.

B) Las muestras 19, 7, 17, 13, 21, 9, 1, 3, 20, 18, 16 y 5, se encuentran dentro del campo intermedio entre el tipo cálcico y el sódico tendiendo más hacia el cálcico. En estas muestras se tiene también una característica en común que es la de pertenecer a pozos que atraviesan espesores considerables de material aluvial, ya sea del Graben de Aguascalientes (Pozo Cóbano y 3 Helenas, correspondientes a las muestras 16 y 3) o del oriente de la zona de estudio (Material aluvial Terciario). En esta última porción generalmente atraviesan primero la toba Zoyatal; y en cuanto a las proporciones de ambas litologías que explotan principalmente, estas varían pues algunos pozos tienen mayores espesores de toba sobre el material aluvial, mientras que en otros el espesor de este último supera al anterior en más del 50% (tal es el caso de los pozos Conejal, Sn. Antonio de los Pedroza y, posiblemente El Gato; muestras 18, 17, y 12 respectivamente).

C) Por lo que respecta a la muestra 10 que tiende hacia el extremo sódico, y a las muestras 23, 22 y 4 que están dentro de ese dominio, corresponden la primera a un pozo que extrae agua de la Toba Zoyatal en un medio muy fracturado, y las demás a pozos que extraen el agua de grandes espesores de ignimbrita.

En cuanto al contenido de aniones, todas las muestras se sitúan en el extremo del  $\text{HCO}_3$ .

Finalmente, sobreponiendo a este diagrama las subdivisiones propuestas por Back (Fig. VI.1), se puede observar que:

- La facies dominante en la zona de estudio es la Bicarbonatada cálcico-sódica correspondiente al segundo grupo descrito (B), pues la mayor concentración observada se encuentra dentro del triángulo intermedio, que es el que engloba las mezclas de facies; por lo tanto esta es la facies representativa de la combinación litológica Toba Zoyatal - Material Aluvial o bien, material aluvial únicamente.

- En segundo lugar se presenta la facies Bicarbonatada cálcica, a la que pertenece el grupo de muestras extraídas principalmente de la Toba Zoyatal descrito en el inciso A.

- Y la bicarbonatada sódica, corresponde al tercer grupo descrito, o sea al agua que se extrae de las Ignimbritas. También pertenece a esta facies la muestra del pozo Calvillito 1 (muestra 10), la cual se analizará con mayor detalle cuando se trate la temperatura.

**Diagrama de Schöeller-Berkaloff (Fig. VI.2)**

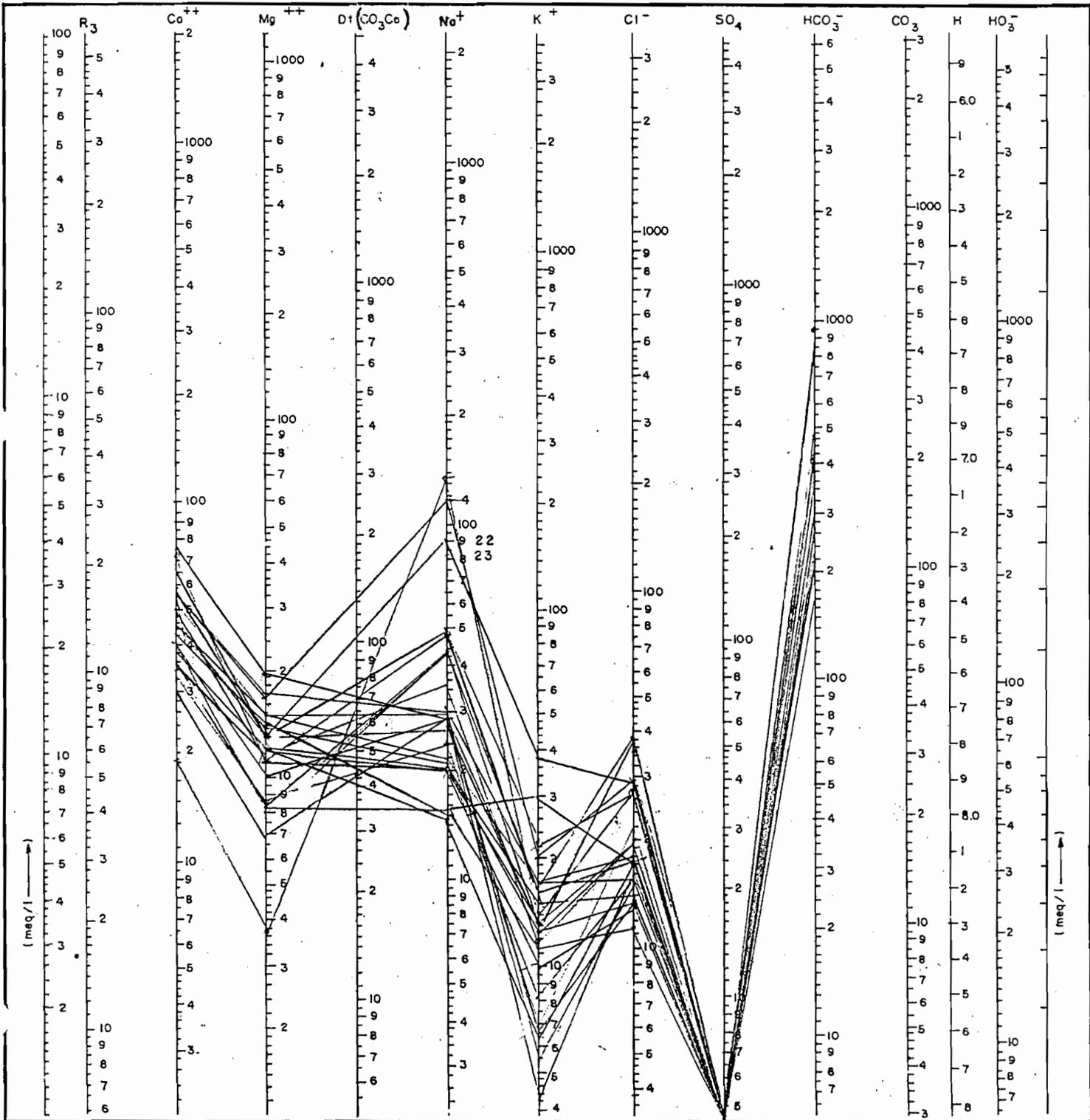
La figura VI.2, indica que la tendencia química general de las muestras es guardar la misma relación en sus proporciones aniónicas y catiónicas, pues ninguna presenta sulfato, todas tienen alrededor del 90% de Bicarbonato como anión dominante y la mayoría describen rectas paralelas Ca-Mg-Na-Cl. Sin embargo puede distinguirse un tipo menor que no respeta dicho patrón. Lo constituyen las muestras 4, 22, y 23 que corresponden a los pozos que extraen agua de las ignimbritas, y se observa un ascenso fuerte en los contenidos de sodio que en la muestra 4 resalta, además, por la fuerte disminución en el contenido de calcio. Cabe mencionar que esta última muestra, que es la de menor contenido en calcio, es también la de mayor contenido en sodio.



# ESTUDIOS Y TECNICAS ESPECIALIZADAS EN INGENIERIA, S. A. DE C. V.

Fig. VI.2

Diagrama Semilogarítmico de Schoeller-Berkaloff



## **VI.4 PARAMETROS HIDROGEOQUIMICOS**

### **SOLIDOS TOTALES DISUELTOS**

#### **Aspectos teóricos**

El total de sólidos disueltos se refiere al peso de sólidos resultado de evaporar un litro de agua (residuo seco) más el producto de multiplicar el peso del ión bicarbonato por una constante. Lo cual significa que el total de sales disueltas difiere del residuo seco a 110 °C o 180 °C debido a que durante el calentamiento el bicarbonato puede descomponerse en carbonato que se precipite y bióxido de carbono que se escape.

Por lo tanto cuando se calculan los sólidos totales disueltos debe considerarse la pérdida de CO<sub>2</sub> por evaporación (2 moles de bicarbonato -122g- se convierten en una mol de carbonato - 60g - del residuo seco)

La concordancia entre los sólidos totales medidos y los calculados debe ser no mayor al 20%. En aguas con altos contenidos de sulfato y cloro, puede ser difícil determinar los S.T.D.

#### **Resultados**

A partir de los resultados de concentraciones de iones principales en una muestra de agua, puede calcularse el valor de S.T.D. mediante la siguiente expresión (J. W. Lloyd, 1985)

$$S.T.D. = Ca + Mg + Na + K + Cl + (HCO_3 \times 30/61).$$

Este tipo de cálculo se utiliza generalmente para comprobar que un análisis está bien realizado, sin embargo para el presente estudio se ha considerado válido utilizarlo para conocer los S.T.D. por el hecho de no presentarse las condiciones antes mencionadas que restringen su uso para dicho fin, ya que en todas las muestras analizadas no fué encontrado Sulfato y los valores de Cloro son muy bajos de manera que el bicarbonato representa aprox. el 90% del total de aniones. Con esta observación, y considerando además que el balance iónico registró porcentajes de error muy bajos, se esperan errores menores de 20% al aplicar este método.

En la Tabla VI.2.2 se presentan los resultados del Laboratorio, así como el resultado del cálculo de los porcentajes de error a partir del balance iónico. Los resultados del cálculo de S.T.D. se presentan en la tabla VI.3

TABLA VI.2.2. RESULTADO DE LOS ANALISIS DE LABORATORIO, Y CALCULO DE ERROR EN PORCENTAJE, ASI COMO CALCULO DE PORCENTAJES DE CADA ION PRINCIPAL.

NO. MUESTRA	HCO3 meq/l	SO4 meq/l	Cl meq/l	Na meq/l	K meq/l	Ca meq/l	Mg meq/l	Fe mg/l	SiO2 mg/l	SUMA DE ANIONES meq/l	SUMA DE CATIONES meq/l	ERROR EN %	% DE HCO3	% DE SO4	% DE Cl	% DE Na	% DE K	% DE Ca	% DE Mg
1	3.60	0.00	0.61	1.06	0.18	1.65	0.71	0.02	254.00	4.21	3.6	-7.81	85.51	0.00	14.49	29.44	5.00	45.83	19.72
3	3.40	0.00	0.55	1.52	0.26	1.75	0.95	0.02	334.00	3.95	4.48	6.29	86.08	0.00	13.92	33.93	5.80	39.06	21.21
4	6.60	0.00	0.75	6.00	0.36	0.91	0.31	0.02	234.00	7.35	7.58	1.54	89.80	0.00	10.20	79.16	4.75	12.01	4.09
5	6.80	0.00	0.75	2.10	0.57	3.69	0.93	0.08	274.00	7.55	7.29	-1.75	90.07	0.00	9.93	28.81	7.82	50.62	12.76
6	3.60	0.00	0.32	0.68	0.29	2.02	0.68	0.02	254.00	3.92	3.67	-3.29	91.84	0.00	8.16	18.53	7.90	55.04	18.53
7	3.90	0.00	0.55	1.12	0.34	2.40	1.08	0.09	294.00	4.45	4.94	5.22	87.64	0.00	12.36	22.67	6.88	48.58	21.86
8	4.00	0.00	0.46	0.88	0.32	2.56	1.00	0.02	314.00	4.46	4.76	3.25	89.69	0.00	10.31	18.49	6.72	53.78	21.01
9	3.80	0.00	0.49	0.65	0.74	2.09	1.13	0.03	314.00	4.29	4.61	3.60	88.58	0.00	11.42	14.10	16.05	45.34	24.51
10	3.90	0.00	1.07	1.90	0.41	1.75	0.65	0.03	314.00	4.97	4.71	-2.69	78.47	0.00	21.53	40.34	8.70	37.15	13.80
11	3.80	0.00	0.43	0.93	0.21	2.38	1.12	0.05	294.00	4.23	4.64	4.62	89.83	0.00	10.17	20.04	4.53	51.29	24.14
12	4.80	0.00	0.40	0.87	0.39	2.91	1.19	0.10	334.00	5.2	5.36	1.52	92.31	0.00	7.69	16.23	7.28	54.29	22.20
13	4.80	0.00	0.50	1.29	0.43	2.85	1.41	0.06	254.00	5.3	5.98	6.03	90.57	0.00	9.43	21.57	7.19	47.66	23.58
14	6.00	0.00	0.55	1.21	0.33	3.78	1.62	0.09	334.00	6.55	6.94	2.89	91.60	0.00	8.40	17.44	4.76	54.47	23.34
15	4.20	0.00	0.43	0.90	0.44	2.65	1.09	0.03	334.00	4.63	5.08	4.63	90.71	0.00	9.29	17.72	8.66	52.17	21.46
16	5.20	0.00	0.52	1.78	0.43	2.90	1.10	0.02	274.00	5.72	6.21	4.11	90.91	0.00	9.09	28.66	6.92	46.70	17.71
17	4.20	0.00	0.43	1.26	0.14	2.31	1.25	0.02	294.00	4.63	4.96	3.44	90.71	0.00	9.29	25.40	2.82	46.57	25.20
18	3.40	0.00	0.38	1.22	0.17	1.52	0.56	0.05	314.00	3.78	3.47	-4.28	89.95	0.00	10.05	35.16	4.90	43.80	16.14
19	3.60	0.00	0.49	0.81	0.16	1.95	1.01	0.02	274.00	4.09	3.93	-2.00	88.02	0.00	11.98	20.61	4.07	49.62	25.70
20	3.80	0.00	0.46	1.22	0.12	2.04	0.84	0.03	254.00	4.26	4.22	-0.47	89.20	0.00	10.80	28.91	2.84	48.34	19.91
21	3.00	0.00	0.40	0.90	0.26	1.75	0.95	0.08	234.00	3.4	3.86	6.34	88.24	0.00	11.76	23.32	6.74	45.34	24.61
22	8.40	0.00	0.81	5.10	0.53	2.90	1.36	0.05	234.00	9.21	9.89	3.56	91.21	0.00	8.79	51.57	5.36	29.32	13.75
23	7.60	0.00	0.81	4.00	0.97	3.30	1.10	0.05	214.00	8.41	9.37	5.40	90.37	0.00	9.63	42.69	10.35	35.22	11.74

En el Mapa Hidrogeoquímico (VI.1) se ilustra mediante diagramas de Stiff la concentración de los iones principales y dentro de cada firma se incluye el valor de los sólidos totales disueltos. Además en el mapa VI.2 se presenta la configuración de los mismos valores.

También en la figura VI.3 (Diagrama de Durov), puede observarse representada la distribución de las muestras en el rectángulo mayor conforme a su valor de S.T.D. En esta gráfica se observan tres zonas principales: una concentración muy clara dentro del rango comprendido entre los 175 y los 250 mg/l y que corresponde a los contenidos en sólidos más bajos del total de las muestras analizadas, posteriormente se tiene una zona intermedia que aunque no se presenta como una zona de concentración de puntos graficados representa la transición entre los dos extremos de concentración total en sólidos; finalmente, ya en la porción derecha del rectángulo se presentan los valores de S.T.D. más altos. A continuación se analizan dichos resultados.

La agrupación máxima de puntos en el diagrama corresponde a las siguientes muestras de menor a mayor concentración: 21, 6, 18, 19, 1, 3, 20, 11, 9, 8, 7, 17, y 15. Refiriendo dichas muestras a sus diagramas de Stiff (plano VI.1) se observa que estas concentraciones corresponden a pozos que extraen agua de la Toba Zoyatal única o predominantemente, pues en los casos en que extraen agua también de pequeños espesores de brecha y de Ignimbrita estas últimas se encuentran sobreyacidas por un espesor de por lo menos 200 m de toba Zoyatal; tal es el caso de las muestras obtenidas de los pozos Cumbres (M-15), Morelos 4 (M-6), Morelos 3 (M-1), y Calvillito 2 (M-11). Por lo tanto se puede generalizar diciendo que el agua que se explota de la Toba Zoyatal es la menos concentrada en sólidos.

El rango de concentración intermedia (250 a 275 mg/l) corresponde a las muestras de los pozos Calvillito 1 (M-10) cuya profundidad total fué perforada a través de la Toba Zoyatal, y El Gato (M-12) perforado a través de una secuencia que atraviesa por lo menos 100 m de Material Aluvial del Terciario.

Finalmente, en el diagrama de Durov se observa que los valores más altos de S.T.D. corresponden a las muestras 16, 14, 5, 4, 23, y 22 con 314, 335, 386, 396, 466, y 493 mg/l respectivamente. Ubicando dichas muestras en el Mapa Hidrogeoquímico se observa que la primera y tercera (16 y 5) de estas muestras corresponden a pozos perforados dentro del graben y separados solamente 400 y 50 m de la traza de la falla respectivamente; mientras que la segunda (14) corresponde a una zona donde se presenta la secuencia de Material Aluvial del Terciario sobre la Toba Zoyatal. Las muestras 4, 23, y 22 que registraron los valores más altos de S.T.D., corresponden a los pozos que explotan los espesores más considerables de Ignimbrita (de 120 m a 294 m) y además se encuentran muy cerca de la traza de la falla. Una característica común de las seis muestras más concentradas en

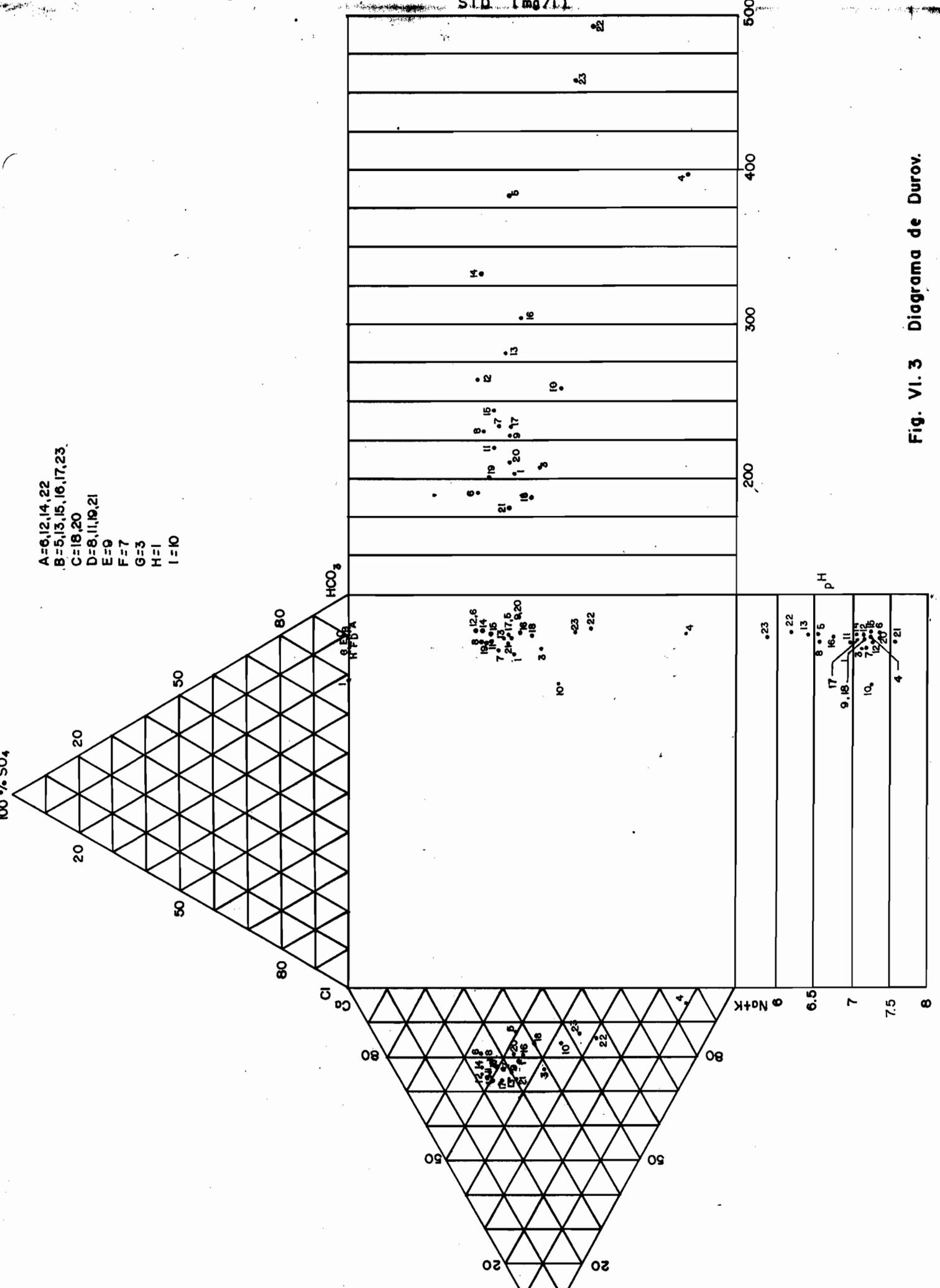


Fig. VI.3 Diagrama de Durov.

sales, es la de que se hallan alineadas a lo largo de la falla (sea que se encuentren de uno u otro lado - graben o pilar - ) y muy cerca de la misma.

## **POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)**

La determinación del pH se efectuó en el laboratorio. Su valor es función de las concentraciones de  $\text{CO}_2$ , ácido orgánico,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{CO(OH)}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  y  $\text{Mg(OH)}_2$  y sobre su valor tiene gran influencia también la temperatura del agua.

El diagrama de Durov, fig. VI.3 presenta en su rectángulo inferior una relación que pretende ilustrar la evolución química del agua basándose en su pH. Comparando la distribución de los puntos graficados en este con aquellos graficados en el rectángulo correspondiente a S.T.D. se observa que existe una relación inversa entre el contenido de S.T.D. y el valor de pH medido en las muestras. Las muestras que registran los mayores valores de pH son la 21, 6, y 20 y en general se observa en el rectángulo, la misma agrupación que existe en aquel que representa el contenido de sólidos totales disueltos, solo que en sentido inverso. De modo que la muestra con mayor cantidad de sólidos disueltos (22) es la que tiene menor pH y lo mismo ocurre con la muestra menos concentrada en sólidos (21) que tiene el valor de pH más alto.

Por otra parte, se observa que las muestras 22 y 23 que son las de temperatura más alta son también las que registran el pH más bajo, sin embargo esta relación no puede generalizarse puesto que la muestra que registra la temperatura inmediata inferior a estas que es la M-4 registra uno de los pH más altos. A este respecto se aclara que a pesar de que existe relación entre el pH y la temperatura, en este caso no puede considerarse directa puesto que la temperatura fue medida en campo y el pH se midió después en laboratorio. Considerando pues el error analítico correspondiente, así como el hecho de que la relación que guardan los parámetros físico-químicos con cada tipo de agua está absolutamente controlada por el ambiente geológico en que se encuentren tampoco se observa ninguna relación entre el valor de pH y la composición química de cada muestra.

## **ALCALINIDAD**

La alcalinidad es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos y permite conocer las concentraciones de Carbonato, Bicarbonatos e Hidratos alcalinos contenidos en el agua.

Para todas las muestras analizadas la alcalinidad total la aporta el ión bicarbonato pues son nulas las cantidades de Sulfato y de Carbonato detectadas.

TABLA VI.2.1  
 TABLA DE RESULTADOS DE LOS ANALISIS FISICO-QUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA, AGS.

APROVECHAMIENTO	NO. MUESTRA	pH Laboratorio	CONDUCTIVIDAD mohs/cm	DUREZA CaCO3	ALCALINIDAD CaCO3	TEMP. oc CAMPO
POZO MORELOS 3	1	7.00	336.00	2.36	3.60	33
POZO 3, HELENAS	3	7.20	310.00	2.70	3.40	34
POZO VIOLETAS	4	7.30	609.00	1.22	6.60	39
P. PUERTECITO	5	6.60	648.00	4.62	6.80	32
P. MORELOS 4	6	7.40	226.00	2.70	3.60	28
POZO PANORAMA	7	7.20	294.00	3.48	3.90	27
POZO ASTURIAS	8	7.10	308.00	3.56	4.00	26
POZO MALACATE	9	7.20	295.00	3.22	3.80	29
P. CALVILLITO 1	10	7.30	711.00	2.40	3.90	33
P. CALVILLITO 2	11	7.00	314.00	3.50	3.80	25
POZO DE GATO	12	7.20	291.00	4.10	4.80	27
MANAN. PENUELAS	13	6.40	259.00	4.26	4.80	20.5
POZO CUERVOS	14	7.10	424.00	5.40	6.00	23.5
POZO CUMBRES	15	7.30	298.00	3.74	4.20	27
POZO COBANO	16	6.80	335.00	4.00	5.20	30
POZO SAN ANTONI	17	7.10	296.00	3.56	4.20	24
POZO CONEJAL	18	7.20	267.00	2.08	3.40	27
POZO N. OJO CAL.	19	7.30	227.00	2.96	3.60	24
POZO COBOS	20	7.40	298.00	2.88	3.80	27.5
POZO CHIFLIDO	21	7.60	239.00	2.70	3.00	32
POZO CENTENARIO	22	6.20	674.00	4.26	8.40	40
POZO 92	23	5.90	667.00	4.40	7.60	40

LA VI.3  
ULTADO DEL CALCULO DE STD, Y DE LA TRANSFORMACION A mg/l

MUESTRA	HCO3 meq/l	SO4 meq/l	Cl meq/l	Na meq/l	K meq/l	Ca meq/l	Mg meq/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	S.T.D. mg/l
1	3.6	0	0.61	1.06	0.18	1.65	0.71	219.6	0	21.66	24.38	7.04	33.00	8.59	202.66
3	3.40	0.00	0.55	1.52	0.26	1.75	0.95	207.4	0	19.53	34.96	10.17	35.00	11.49	213.15
4	6.60	0.00	0.75	6.00	0.36	0.91	0.31	402.6	0	26.63	138.00	14.08	18.20	3.75	398.65
5	6.80	0.00	0.75	2.10	0.57	3.69	0.93	414.8	0	26.63	48.30	22.29	73.80	11.25	386.26
6	3.60	0.00	0.32	0.68	0.29	2.02	0.68	219.6	0	11.36	15.64	11.34	40.40	8.23	194.97
7	3.90	0.00	0.55	1.12	0.34	2.40	1.08	237.9	0	19.53	25.76	13.29	48.00	13.07	236.65
8	4.00	0.00	0.46	0.88	0.32	2.56	1.00	244	0	16.33	20.24	12.51	51.20	12.10	232.38
9	3.80	0.00	0.49	0.65	0.74	2.09	1.13	231.8	0	17.39	14.95	28.93	41.80	13.67	230.75
10	3.90	0.00	1.07	1.90	0.41	1.75	0.65	237.9	0	37.98	43.70	16.03	35.00	7.87	257.58
11	3.80	0.00	0.43	0.93	0.21	2.38	1.12	231.8	0	15.27	21.39	8.21	47.60	13.55	220.02
12	4.80	0.00	0.40	0.87	0.39	2.91	1.19	292.8	0	14.20	20.01	15.25	58.20	14.40	266.06
13	4.80	0.00	0.50	1.29	0.43	2.85	1.41	292.8	0	17.75	29.67	16.81	57.00	17.06	282.29
14	6.00	0.00	0.55	1.21	0.33	3.78	1.62	366	0	19.53	27.83	12.90	75.60	19.60	335.46
15	4.20	0.00	0.43	0.90	0.44	2.65	1.09	256.2	0	15.27	20.70	17.20	53.00	13.19	245.36
16	5.20	0.00	0.52	1.78	0.43	2.90	1.10	317.2	0	18.46	40.94	16.81	58.00	13.31	303.52
17	4.20	0.00	0.43	1.26	0.14	2.31	1.25	256.2	0	15.27	28.98	5.47	46.20	15.13	237.04
18	3.40	0.00	0.38	1.22	0.17	1.52	0.56	207.4	0	13.49	28.06	6.65	30.40	6.78	187.37
19	3.60	0.00	0.49	0.81	0.16	1.95	1.01	219.6	0	17.39	18.63	6.26	39.00	12.22	201.50
20	3.80	0.00	0.46	1.22	0.12	2.04	0.84	231.8	0	16.33	28.06	4.69	40.80	10.16	214.05
21	3.00	0.00	0.40	0.90	0.26	1.75	0.95	183	0	14.20	20.70	10.17	35.00	11.49	181.56
22	8.40	0.00	0.81	5.10	0.53	2.90	1.36	512.4	0	28.76	117.30	20.72	58.00	16.46	493.23
23	7.60	0.00	0.81	4.00	0.97	3.30	1.10	463.6	0	28.76	92.00	37.93	66.00	13.31	465.99

## **TEMPERATURA Y PROCESOS TERMALES**

Freeze y Cherry, 1979, mencionan respecto a la temperatura del agua subterránea que a escala global, el régimen termal de la tierra involucra el flujo de calor de las capas profundas del planeta hacia su superficie. El gradiente geotérmico que dá la evidencia de este flujo de calor nos dice que en promedio la temperatura aumenta aprox.  $1^{\circ}\text{C}$  por cada 40 m de profundidad (aunque otros autores mencionan un valor medio terrestre de 33 m). Sin embargo este gradiente no es uniforme. En los primeros 10 m de profundidad o más, las variaciones estacionales o diurnas provocan que esta sea una zona térmica transitoria. Debajo de la misma, los efectos de la temperatura del aire son amortiguados rápidamente, pero pueden darse gradientes geotérmicos anómalos en al menos tres de las siguientes formas:

- 1.- Como resultado de las variaciones en la conductividad termal entre las formaciones geológicas.
- 2.- Como una respuesta a volcanismo reciente o fuentes intrusivas de producción de calor a profundidad.
- 3.- Debido a la redistribución espacial de calor, por flujo de agua subterránea.

Por su parte, Del Rey y Hamza, 1989, mencionan también tres causas, donde consideran las dos últimas que acaban de citarse pero dando mayor énfasis al aspecto de geología estructural: "Las variaciones locales fuertes del gradiente geotérmico pueden estar influenciadas por:

- 1.- La presencia de intrusivos.
- 2.- La presencia de discontinuidades estructurales capaces de generar variaciones a gran escala.
- 3.- Flujos de agua a través de fracturas locales."

Generalmente los regímenes termales asociados al flujo natural del agua, están asociados al emplazamiento de plutones.

De acuerdo con Schoeller (1962), el agua puede ser de los tres siguientes tipos en función de su temperatura:

Hiperterma o Termal: cuando su temperatura sea mayor que la media del lugar +  $4^{\circ}\text{C}$ .

Ortoterma o normal: cuando su temperatura sea mayor o igual que la temperatura media del lugar pero menor que el límite arriba mencionado para la

termal.

Hipoterma o fría: Cuando su temperatura sea menor a la media del lugar.

En el capítulo II del presente Estudio se reporta una temperatura media anual obtenida para la zona de interés igual a 18°C. Por lo tanto, basados en el criterio de Schöeller, la temperatura a partir de la cual el agua puede considerarse termal es de 22°C, y todas las muestras analizadas se encuentran en la categoría de aguas termales. A continuación se presenta la lista de la Temperatura, que fué medida al momento de obtener la muestra en el campo.

**TEMPERATURA**

**POZO**

(Se indica el no.de muestra entre paréntesis)

23.5°C	Cuervos (M-14)
24°C	Sn. Antonio (M-17), N. Ojo Cal.(M-19).
25°C	Calvillito 2 (M-11)
26°C	Asturias (M-8)
27°C	El Gato (M-12), Cumbres (M-15), Conejal (M-18), Panorama (M-7).
27.5°C	Cobos (M-20)
28°C	Morelos 4 (M-6)
29°C	Malacate (M-9)
30°C	Cobano (M-16)
32°C	Puertecito ( M-5), Chiflido (M-21)
33°C	Morelos 3 (M-1), Calvillito 1 (M-10)
34°C	3 Helenas (M-3)
39°C	Violetas (M-4)
40°C	Centenario (M-22), Pozo 92 (M-23)

Como puede observarse, oscilan entre 40 y 23 grados centígrados. La distribución de las mismas es a lo largo de dos franjas paralelas. La primera oriental, limítrofe a la falla, es donde se concentran las temperaturas más altas y sin embargo se observan dentro de la misma franja, dos tipos de comportamientos: a lo largo de la falla, las muestras que caen dentro del graben

presentan temperaturas considerablemente más bajas que las que están al oriente de la misma, y dentro de estas últimas las muestras obtenidas de los pozos que explotan las ignimbritas presentan temperaturas más altas que las obtenidas de los que explotan las tobas.

Ello puede explicarse por el hecho de que el intenso fracturamiento de la ignimbrita así como la naturaleza del mismo, genera mucho mayor turbulencia y la presencia de la falla, con su correspondiente sistema de fracturas asociadas a ella (ver Mapa Estructural), induce a una circulación más profunda, de manera que la antes mencionada redistribución espacial de calor por flujo de agua subterránea se está poniendo de manifiesto en las zonas de importante fracturamiento, interconectado, y que por lo tanto favorece una más rápida ascensión del agua.

A este respecto, Del Rey y Hamza, 1989, en su trabajo: "Terrestrial heat flow variations in the northeastern part of the state of Sao Paulo: A case for transport of geothermal heat by interfracture fluids flows" explican lo siguiente: "Los fluidos que entran a las discontinuidades estructurales pueden penetrar a profundidad dependiendo de las variaciones de permeabilidad y del grado de interconexión de las mismas. Los patrones de flujo son generalmente complicados y las magnitudes de dichos flujos decrecen rápidamente con la profundidad. En muchos casos son indicadores de que el flujo existe a profundidad de varios kilómetros en la corteza terrestre. Asociado con dichos flujos está el transporte de calor advectivo, y es indudable que flujos profundos son muy eficientes medios de transportar el calor geotérmico desde la profundidad. Los fluidos ascendentes se descargan en acuíferos someros de sistemas de drenajes naturales. En casos donde esta descarga produce cambios locales significativos de temperatura la presencia de sistemas de circulación se vuelve fácilmente identificable." Como resultado de dicho trabajo, los autores presentan un mapa del área que fue estudiada donde se observa la distribución espacial de los manantiales termales. Estos se agrupan alrededor de las discontinuidades (fracturas y fallas), constituyendo zonas aisladas rodeadas por otras donde el agua subterránea presenta temperatura considerablemente más baja, representando estas últimas, zonas de agua enfriada por la infiltración del agua meteórica y superficial, y las primeras flujos de circulación más profunda.

Algo muy similar a lo anterior está sucediendo en el área objeto del presente estudio, puesto que la distribución de la temperatura sobre el plano presenta fuertes contrastes horizontales en distancias muy cortas (desde 1 hasta 3 km) tal como se observa en el mapa VI.3 (Curvas de Igual Temperatura) donde puede verificarse que a partir de la línea de falla hacia el oriente se manifiesta un cambio de temperatura que va de 4 a 14°C en distancias de 3 Km en promedio. La excepción a esta variación horizontal se encuentra en la porción donde aflora la Ignimbrita (centro del mapa, pozo Centenario) debido a que esta

zona tiene un fuerte fracturamiento que fué distinguido en el campo (punto de verificación 1 del Mapa Estructural) y por lo tanto la alta temperatura, que de hecho es la mayor de la zona ( $40^{\circ}\text{C}$ ), se prolonga al noreste hacia el pozo 92 (ver en el mapa III.4.1 - distribución de unidades litoestratigráficas en el subsuelo- como a lo largo de esa línea se prolongan los gruesos espesores de ignimbrita que explotan los pozos). De hecho se ha comprobado (ver capítulo VII) que el flujo en la zona de estudio está predominantemente controlado por el fracturamiento con la evidencia de los fuertes contrastes en transmisividad entre la Ignimbrita y la Toba Zoyatal ( $6.23 \times 10^{-2}$  a  $3.11 \times 10^{-5}$ , respectivamente).

Existe otra zona donde se presenta el mismo contraste fuerte, horizontalmente, entre dos pozos separados menos de 1 km. Son los pozos Calvillito 1 y 2 y la variación de su temperatura es de  $25^{\circ}\text{C}$  del segundo a  $33^{\circ}\text{C}$  del primero. Esta resulta una zona interesante para apoyar la idea que se propone antes puesto que habiendo tan poca distancia entre uno y otro pozo presentan variaciones importantes en la elevación de su nivel estático (el de mayor temperatura registra 27 metros menos en su elevación con respecto al otro aún cuando ambos se encuentran a la misma cota), en su composición química (al de mayor temperatura le corresponde la facies bicarbonatada sódica contrastando con la cálcica del otro y de todos los de esa porción oriental, además de presentar un contenido considerablemente más alto en cloro que los demás). Por último, al consultar el mapa estructural se encuentra que el pozo del agua más caliente, está atravesado por una fractura importante (que no pasa por el otro), identificada en la imagen de Satélite, y que además ese punto localmente presenta un fracturamiento importante que fué medido en el campo (Punto de verificación 4).

Regresando a la distribución general de temperaturas en el mapa, la segunda franja que se menciona al principio, correspondiente a los valores más bajos de Temperatura, es la Oriental y corresponde a las muestras con menor concentración de sólidos totales, a partir de la falla. Podría señalarse una tendencia a disminuir la temperatura conforme más lejos se esté de la falla, hacia el oriente.

#### **Possible fuente termal**

El agua subterránea está poniendo de manifiesto un fuerte gradiente geotérmico a profundidad cuya causa bien podría atribuirse a la presencia de alguna cámara magmática en la región, considerando que la mineralización más importante que se reporta en la misma, ha sido provocada por la presencia de intrusivos. Sin embargo, el último evento volcánico que se conoce en la zona corresponde al Terciario y no se conoce alguna evidencia de que aquella cámara exista en el presente. Por otra parte, en el capítulo de Geología Histórica del presente estudio se menciona el cambio de régimen tectónico ocurrido en el Mioceno, como responsable de un adelgazamiento de la corteza

terrestre en la Meseta Central y dicho espesor, que es considerado el menor en la República Mexicana podría ser la causa más importante de la manifestación del flujo térmico terrestre en la superficie puesto que, a lo largo de toda la Meseta Central se ha reportado la existencia de hidrotermalismo.

En cuanto a la magnitud de la temperatura del sistema hidrotermal a profundidad, existen indicadores geoquímicos que permiten informar sobre las mismas. Entre los más importantes, Custodio 1975, menciona que el Sílice es el mejor indicador de la temperatura profunda para valores menores a  $200^{\circ}\text{C}$ . Dicha temperatura se determina a partir de una tabla propuesta por Fournier y Truesdell en 1970, donde se relaciona el contenido de  $\text{SiO}_2$  en p.p.m. contra la temperatura a profundidad en  $^{\circ}\text{C}$ . Para el presente estudio se obtuvo un promedio del contenido de  $\text{SiO}_2$  igual a 283 p.p.m., y ello llevó a determinar una temperatura del sistema hidrotermal ligeramente superior a los  $200^{\circ}\text{C}$ . Este resultado se ve apoyado por lo también indicado por Custodio (op. cit.) respecto a que presencia de costras silíceas indica temperaturas superiores a los  $180^{\circ}\text{C}$ , y como se habrá visto en la estratigrafía, la toba Zoyatal contiene abundante material silíceo (como gel).

Se propone, que a partir de dicha temperatura profunda, mediante un cálculo simple que involucre el gradiente geotérmico que se menciona al principio del análisis de este parámetro, se infiera grosso modo la profundidad a la que se encuentra el sistema hidrotermal.

Considerando pues que la temperatura a profundidad podría ser de arrox.  $200^{\circ}\text{C}$ , con un gradiente de  $1^{\circ}\text{C}$  por cada 40 m, y dado que el agua más representativa de ese flujo se está obteniendo a  $40^{\circ}\text{C}$ , la profundidad del sistema podría hallarse a 6,400 m. Sin embargo, dado que el gradiente geotérmico puede ser variable sobre una misma vertical y que depende mucho del espesor de la corteza terrestre, en un rango de 20 a  $40^{\circ}\text{C}$ , la profundidad de la fuente que se menciona podría incluso duplicarse.

160°

## VI.5 INTERPRETACION DE LOS CONSTITUYENTES QUIMICOS

Un modo muy interesante de analizar la composición química del agua consiste en "reconstruir la fuente de los constituyentes de las muestras" (Garrels, 1976), y desde el punto de vista geológico, es además lo más apropiado para obtener una relación mas congruente con el entorno geológico y no solamente una serie de resultados analíticos con incierta o complicada relación con el terreno litológico que atraviesen los flujos de agua. "Este método es más apropiado aplicarlo en los llamados terrenos monolitológicos o aquellos donde haya un tipo litológico muy predominante" (Garrels, 1976).

Dado que el área en que nos encontramos es predominantemente volcánica (ácida a intermedia), y que el trabajo realizado por este autor está enfocado a las rocas ígneas extrusivas, se consideró muy útil para aplicarlo en el presente análisis hidrogeoquímico.

Garrels, 1976, expone en su artículo "Typical Waters from Igneous Rocks" un trabajo sobre la génesis de aguas que circulan en rocas ígneas -principalmente extrusivas- que incluye las aportaciones de diversos autores (Headden, Clarke, Harrison, Lindgren, Mohr). Los aspectos más importantes, con aplicación al presente estudio parten de las tres siguientes premisas:

- a) Los constituyentes de las aguas subterráneas son debidos al ataque de aguas del suelo conteniendo  $\text{CO}_2$  en exceso (respecto de aquel encontrado en equilibrio con la atmósfera) sobre los silicatos primarios de la roca.
- b) El producto de dilución de rocas ígneas por las aguas subterráneas muestreadas, ha demostrado corresponder en composición a lo obtenido en laboratorio de colocar muestras de roca en agua rica en  $\text{CO}_2$ , cerrando el sistema y observando a cada intervalo de tiempo como aparecen las diferentes fases sólidas inmediatamente después de la saturación.
- c) Ha sido reconocido por diversos autores, que las aguas de rocas ígneas feldespáticas presentan contenidos altos en sílice y son predominantemente  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ .

### Crterios utilizados

Para poder aplicar los principios de este método se partió del análisis petrográfico de las muestras de roca colectadas en el área de estudio y que, como puede verse en el Capítulo III (Ver Estratigrafía) son fundamentalmente silícicas. La plagioclasa que se determinó al microscopio fué la Oligoclasa en las ignimbritas, y debido a que por la naturaleza de las rocas del área el contenido de vidrio es alto y la matriz microlítica, no

puede definirse su composición exacta, sin embargo apoyados en la plagioclasa que se identificó y situándola en la serie isomorfa Ab-An a la que pertenece: el sodio (Albita) supera en 70% al calcio (Anortita). Además, situándolas en el marco geológico regional el vulcanismo que las produjo ha sido determinado esencialmente ácido (Mc Dowell y Clabaugh, 1981).

Es conveniente mencionar que no se pretende considerar al acuífero, como estrictamente volcánico puesto que el área que comprende el presente Estudio es muy pequeña y constituye sólo una porción de la Subcuenca Hidrológica de Aguascalientes, de manera que no se estudió el área de recarga del acuífero, y tampoco parece ser esta la zona de descarga aunque localmente se comporte de ambas formas. Por otra parte se está considerando el hecho de que la naturaleza no suele apegarse a modelos muy teóricos, que ignoren las condiciones complejas inherentes a la misma, pero se puede, hasta donde la ciencia hidrogeoquímica ha podido avanzar, explicar los procesos principales que pudieran estar interviniendo en la composición química del agua basándonos en toda la información de que se pudo disponer como lo son los cortes litológicos (que han facilitado el conocimiento necesario de la geología del subsuelo), el levantamiento geológico a detalle, así como los límites y las características geológicas y morfológicas de la cuenca hidrológica a partir de cartografía existente e imágenes de Satélite .

Como podrá verse en el capítulo Geología del Subsuelo, los cortes litológicos reportan en general una secuencia occidental constituida en el graben por Aluvión Cuaternario, y en los Lomeríos por una secuencia que de la cima a la base está constituida por:

-Depósitos piroclásticos intercalados con material aluvial (Toba Aguascalientes) donde las fracturas se han encontrado rellenas de calcita, y coronadas por espesores de hasta 40 cm de caliche.

-Toba ácida, con intenso fracturamiento relleno de gel silíceo (Toba Zoyatal).

-Brecha volcánica, constituida principalmente por fragmentos de ignimbrita y consolidada por vidrio.

-Ignimbrita.

La secuencia oriental del área de estudio, difiere de esta por presentar potentes espesores (hasta 250m en promedio) de material aluvial que en ocasiones se encuentra parcialmente cementado con carbonatos y óxidos y que fuera del área de estudio, hacia los cerros de Ignimbritas, se encontró descansando directamente sobre estas como producto de su erosión (en los cortes litológicos son descritos como sedimentos riolíticos) y que hacia el área de estudio se fué intercalando en la secuencia occidental a veces bajo la Toba Zoyatal y otras enmedio o sobreyaciéndola. Los cortes litológicos de los pozos al oriente del área de estudio

(fuera de la misma ) se analizaron con objeto de acercarnos a la que se considera una de las zonas de recarga puesto que tanto la Topografía como los resultados de la Piezometría (Capítulo V ) indican que el flujo viene principalmente del oriente.

Lo anterior se ha mencionado con objeto de tener presentes las diferentes litologías a que nos vamos a estar refiriendo, y para resumir podemos mencionar que:

-El área que puede constituir la recarga regional de la zona estudiada está constituida principalmente por las elevaciones orientales de ignimbritas.

-La litología de mayor distribución en el subsuelo de la zona de estudio la constituyen las secuencias volcánicas ácidas (Tobas, brecha volcánica e Ignimbrita).

-Las superficies expuestas en la zona de estudio que favorecen la infiltración del agua, son en su mayoría el material tobáceo arriba descrito (que en el campo se encontró aflorando casi en toda la zona de estudio), y en menor proporción los "sedimentos riolíticos" (Material aluvial Terciario) al sudoriente de la zona.

### **Resultados**

La figura VI.4, ilustra mediante diagramas de barras, la reconstrucción de los minerales fuente de los S.T.D. en aguas que circulan en rocas riolíticas y basálticas; determinados a partir de los iones principales y sílice que poseen actualmente.

Dicha gráfica representa los resultados de numerosos análisis realizados a muestras obtenidas por circulación en este tipo de rocas y resultó además ser congruente con los resultados de experimentos de este tipo en Laboratorio (leer inciso b, al inicio de este subcapítulo). Los resultados de los análisis en estos diagramas de barras están expresados en razones molares de las diferentes especies disueltas a bicarbonato, pero en su trabajo menciona también la misma relación graficando los resultados de los análisis químicos en p.p.m. de sus constituyentes.

Se han ilustrado los dos extremos en composición, para mostrar de qué forma varían las proporciones de los constituyentes químicos del agua conforme esta se vuelve más básica. Pero, como se señaló oportunamente, para este análisis se utilizará el extremo ácido para la discusión de los resultados obtenidos.

En el diagrama correspondiente a Riolitas se pueden ver las conclusiones a que se llegó a partir de la mencionada investigación:

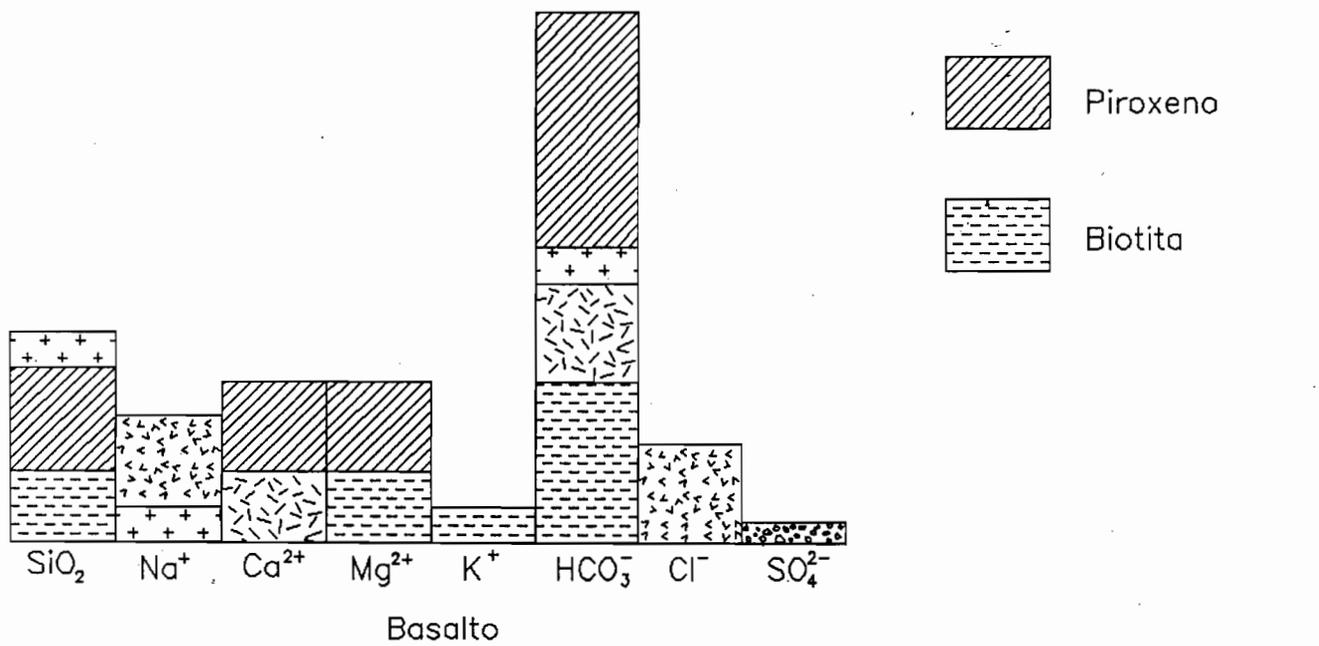
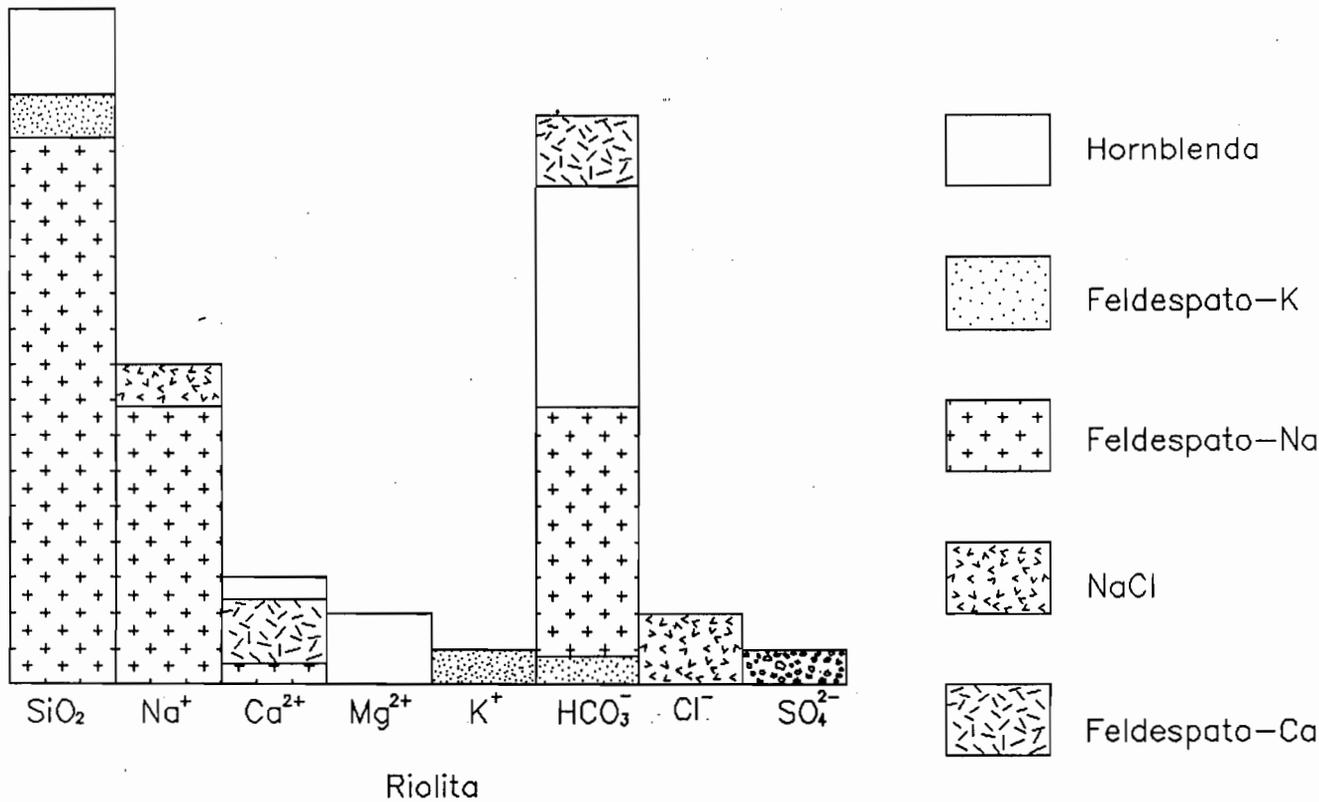


FIG. VI.4 "Reconstrucción de aguas que circulan en Riolitas y Basaltos en función de los minerales fuente de sus iones principales. Se alcanza un balance de masas mientras se mantienen las razones de los constituyentes requeridos para los minerales-individuales: Garrels, 1976.

1.-El sílice disuelto en las aguas deriva principalmente de la descomposición del feldespato sódico, en mucho menor proporción de la hornblenda, y finalmente del feldespato potásico.

2.-El sodio deriva también en su mayoría de la descomposición de las plagioclasas sódicas y en menor proporción del cloruro de sodio (agua meteórica).

3.-El calcio deriva principalmente de las plagioclasas cálcicas y en menor proporción de las sódicas y de la hornblenda.

4.-El magnesio deriva en su totalidad de la hornblenda.

5.-El potasio deriva de la descomposición del feldespato potásico.

6.-El bicarbonato deriva principalmente del feldespato sódico y de la hornblenda y en menor proporción del feldespato cálcico y del potásico.

7.-En cuanto al cloro, este deriva del cloruro de sodio.

Partiendo de estos resultados se realizó para cada muestra su diagrama de barras correspondiente graficando el contenido total de iones principales y sílice en p.p.m., en el mismo orden que los de la gráfica VI.4 con el fin de comparar la proporción que guardan entre sí los constituyentes de cada muestra y poder de ese modo, inferir la procedencia del flujo.

Las gráficas ponen de manifiesto muy claramente cuatro tipos de comportamiento (y se presentan conforme se analice cada uno) en la proporción de constituyentes químicos y son los siguientes:

#### **Grupo hidrogeoquímico 1.**

Muestra 5, pozo Puertecito. Se encuentra en el graben (Aluvión Q)

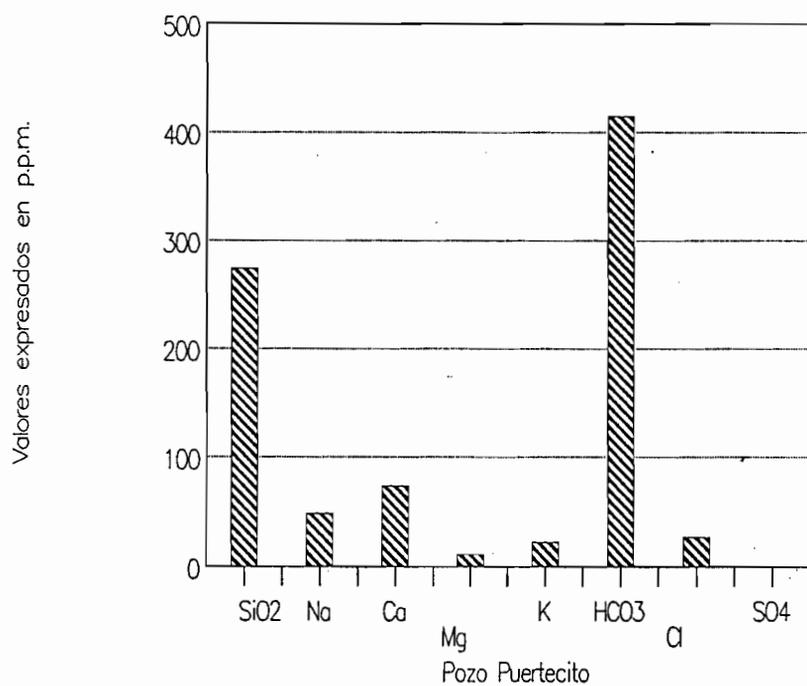
Muestra 14, pozo Cuervos. Se encuentra en el extremo sureste.

Su profundidad total es de 180 m y por su cercanía con el pozo PAB-26 (ver mapa III.4.1) se infiere en este punto una secuencia de Aluvión Terciario (que es lo que el pozo debe estar explotando), descansando sobre la Toba Zoyatal y bajo esta, la Ignimbrita.

Muestra 16, Pozo Cóbano. Se encuentra en el graben (Aluvión Q)

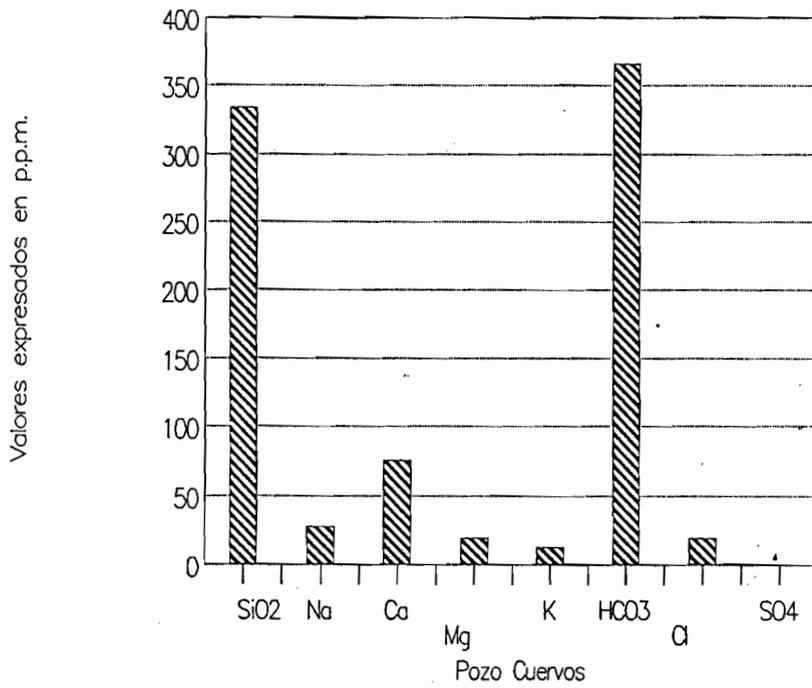
#### **CARACTERISTICAS AFINES A LOS TRES DIAGRAMAS:**

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 5



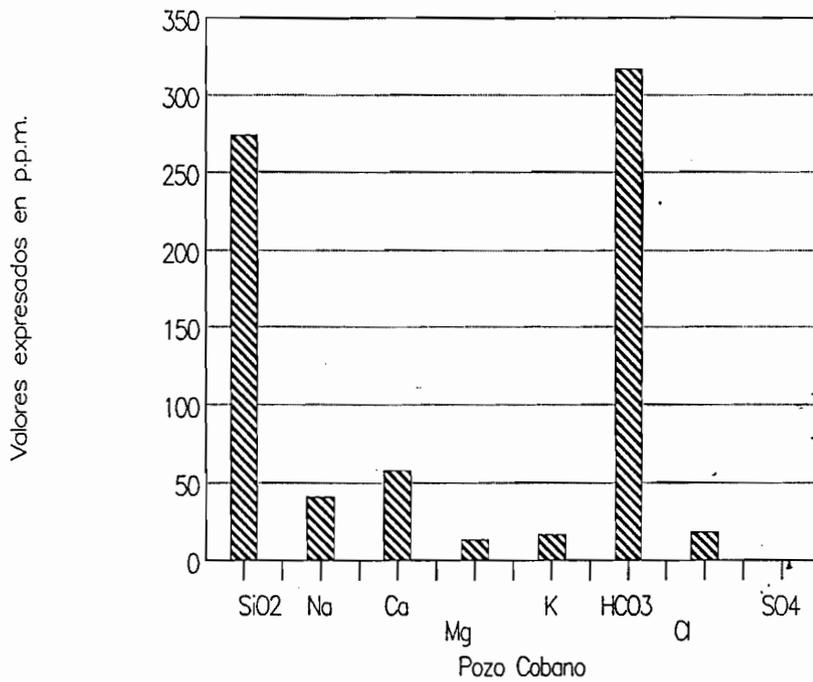
Grupo Hidrogeoquímico 1

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 14



Grupo Hidrogeoquímico 1

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 16



Grupo Hidrogeoquímico 1

- Pertenecen al grupo con mayor cantidad de S.T.D.
- El ión  $\text{HCO}_3^-$  supera el contenido de sílice a razón de 40 a 140 p.p.m.
- El contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  supera al de  $\text{Na}^+$
- Los tres explotan material aluvial.
- Los dos pozos del graben se encuentran muy cercanos a la falla, y como se había mencionado antes presentan altas temperaturas que difieren de las de los pozos que se hallan en la zona de lomeríos. Por lo que respecta al pozo Cuervos, presenta también alta concentración en sólidos, pero es el de menor temperatura en el área de estudio.

#### Interpretación para este grupo:

La temperatura en las dos muestras del graben y la concentración de S.T.D. en las tres, que contrasta con las muestras no cercanas a la falla, puede estar poniendo de manifiesto la mezcla de un flujo profundo alimentando un flujos someros en donde el agua tiene mayor tiempo de residencia y se lleva a cabo una mezcla entre dos facies hidroquímicas diferentes, que como ya se explicó antes son bicarbonatada sódica para el flujo más profundo, y bicarbonatada cálcica para el más somero. La cercanía con la falla (50 m de distancia) es de suma importancia en esta zona pues como podrá verse en el Capítulo V, el acuífero del horst se está descargando directamente en el graben a través de esta y ambas están tan cerca de la misma (50 m), que el agua que extraen es posiblemente la misma que extraen las ignimbritas que están a la misma distancia de la falla pero en el horst. La diferencia en la permeabilidad de ambas litologías, provoca que la temperatura descienda en el graben casi  $10^\circ\text{C}$  y que la facies hidroquímica se altere.

Para la muestra 14, que se encuentra en la localidad Los Cuervos -también conocida como Ojos de Agua- las condiciones varían pues las ignimbritas que se hallan hacia la base del pozo parecen provenir de una fuente distinta de la del resto del área; puesto que el pozo se halla a escasos 3 km al norte del Cerro de ignimbritas Los Gallos que buza hacia este pozo. Por lo tanto la ignimbrita aquí debe encontrarse a menor profundidad que la que viene profundizándose desde el este en los pozos que se hallan al norte del mismo. Por otra parte INEGI cartografía en 1973 un manantial no termal en esta zona, al mismo tiempo que en Ojo Caliente reporta un manantial termal. Esto indica que en la zona de estudio existió un régimen de flujo ascendente (este se discutirá cuando se analice el contenido de sílice) hasta hace poco tiempo (en la actualidad ya no se manifiesta según los

resultados del Capítulo V de este estudio) y respalda las evidencias de comunicación hidráulica entre el flujo en ignimbritas y el del medio granular.

Finalmente, el diagrama indica un contenido de bicarbonato más alto que el de sílice, y esa es la característica más notoria de las muestras extraídas de las ignimbritas (grupo 4) o que ponen en evidencia el flujo más profundo del que se ha hablado, y esta parece ser una evidencia más clara de una mezcla entre dos facies hidroquímicas diferentes.

Conclusión: las muestras del graben más cercanas a la falla están manifestando una mezcla entre la facies bicarbonatada sódica proveniente del flujo profundo y la facies del aluvión Cuaternario lo cual provoca una disminución de aprox. 10°C y empobrecimiento en sodio, pero manteniéndose los altos valores de S.T.D. que caracterizan el flujo más profundo. También se manifiesta esta mezcla del flujo profundo con el agua somera del aluvión Terciario.

#### **Grupo hidrogeoquímico 2.**

Muestra 3, Pozo 3 Helenas. Se encuentra en el graben (Aluvión Q)

Muestra 18, pozo Conejal. Explota 150 m de Material Aluvial  
Terciario bajo 80 m de Toba Zoyatal.

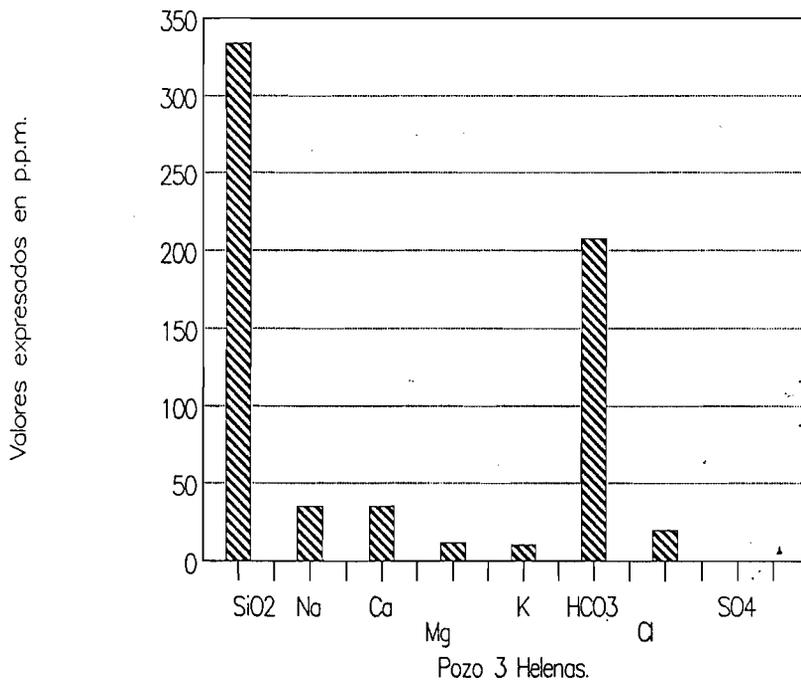
#### **CARACTERÍSTICAS AFINES A AMBOS:**

- Cada una presenta contenidos prácticamente iguales de Na y Ca.
- El contenido de bicarbonato es menor que el de sílice, y es el mismo en ambas muestras.
- Sus proporciones en contenidos de todos los iones y sílice son prácticamente las mismas (sus diagramas son paralelos), pero la muestra del graben (3) tiene un poco más de sólidos disueltos y en esa proporción aumenta cada uno de los constituyentes de la muestra 18, excepto el bicarbonato que permanece igual.
- Ambos explotan material aluvial.

#### **Interpretación para este grupo:**

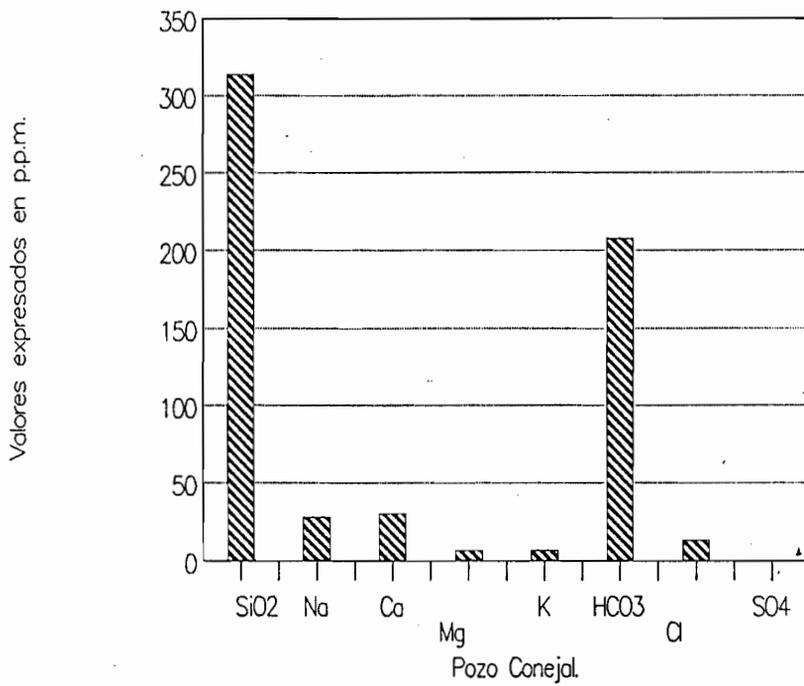
En la Carta Geológica 1:250,000 del INEGI, se observa que el graben de Aguascalientes se encuentra rodeado por elevaciones de Ignimbritas al Norte (Cerro de la Fortuna), al Oeste (Sierra Madre Occidental), al noreste (Tepezalá), y al Este por las tobas

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 3.



Grupo Hidrogeoquímico 2

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 18.



Grupo Hidrogeoquímico 2

ácidas del área de estudio. De manera que sus productos sedimentarios deben ser predominantemente de origen volcánico, y de tipo ácido.

Por otra parte, las elevaciones mayores que limitan las planicies de material aluvial Terciario y que según demuestran los cortes litológicos, le han dado origen, son también cerros de ignimbritas (Xilotepec al norte, C. Juan el Grande al noreste, y Mesa Chinampas al Este).

Lo anterior indica que, puesto que ambos aluviones son resultado de la desintegración de rocas riolíticas, el agua que en ellos se infiltre y resida debe estar enriquecida en productos de alteración de rocas ácidas.

Ello se está viendo claramente en los diagramas de constituyentes químicos correspondientes a las dos muestras de este grupo, cuyo comportamiento es muy similar al determinado por Garrels (op. cit.) para riolitas pues los contenidos de sílice son muy altos y se hallan en equilibrio con el contenido de carbonato.

A partir de estos resultados se interpreta que el material aluvial de la zona está reflejando a través de sus productos de alteración disueltos en el agua, un patrón hidroquímico característico de flujo a través de rocas de composición riolítica. Por lo tanto, apoyados además en la relación que se encontró en el grupo 1, se propone que tanto el material aluvial del graben como el aluvial terciario, tienen esencialmente la misma composición química.

### **Grupo hidrogeoquímico 3.**

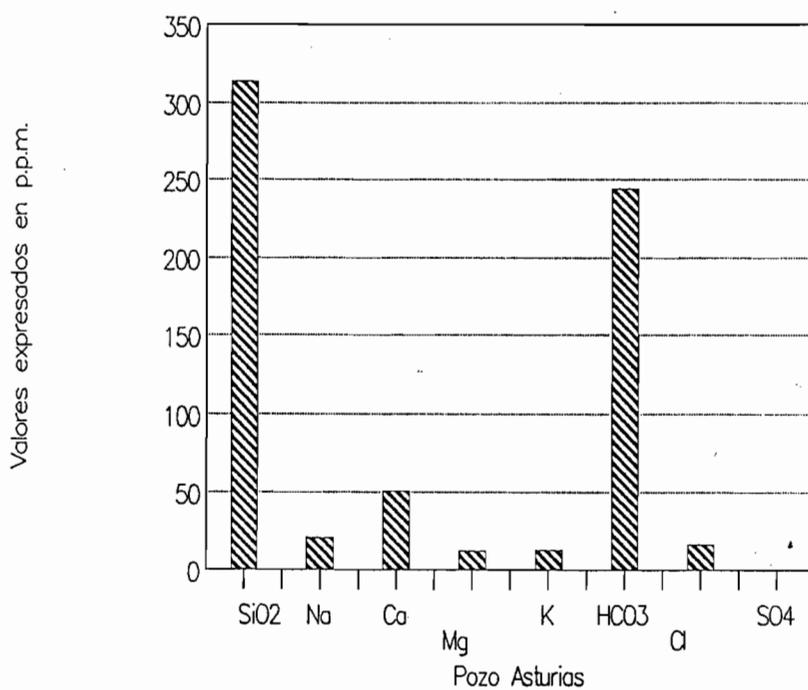
Muestra 21, pozo Chiflido  
Muestra 20, pozo Cobos  
Muestra 19, pozo N.de Ojo Caliente  
Muestra 17, pozo Sn. Antonio  
Muestra 15, pozo Cumbres  
Muestra 12, pozo el Gato  
Muestra 11, pozo Calvillito 2  
Muestra 9, pozo Malacate  
Muestra 8, pozo Asturias  
Muestra 7, pozo Panorama  
Muestra 6, pozo Morelos 4  
Muestra 1, pozo Morelos 3

Nota: Debido a la gran cantidad de muestras, los diagramas correspondientes a este grupo se presentan en el anexo V, y solo se presenta a continuación el más representativo.

### **CARACTERISTICAS AFINES A TODAS LAS MUESTRAS:**

- Explotan la toba Zoyatal

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 8



Grupo Hidrogeoquímico 3

- En gral. el contenido de potasio es igual o ligeramente menor al del magnesio y ello es congruente con los resultados del diagrama de Garrels.

#### Interpretación para este grupo:

Comparando estas muestras con el diagrama de Garrels, se observa el fuerte contraste que existe entre la longitud de la barra que representa el contenido de sílice con respecto de aquellas que representan los de sodio y calcio. Ello significa que en estas muestras el sílice no tiene la proporción con el Na y el Ca representativa del estado de equilibrio con los silicatos normativos de las riolitas. Este desequilibrio refleja claramente algo que tenía que ponerse de manifiesto por el hecho de que la toba Zoyatal se encuentra atravesada por fracturas rellenas de gel silíceo (ver Estratigrafía), y por lo tanto el sílice disuelto en el agua no proviene solamente de la disolución de los silicatos sino que gran parte es aportado por el gel, dada la alta solubilidad del sílice amorfo (esto se explica en la discusión del contenido sílice).

En cuanto al hecho de que el contenido de calcio supere al de sodio en esta zona, puede estarse manifestando el fenómeno de intercambio de bases a través de los productos de alteración de los silicatos: caolinita aparentemente coexistiendo con montmorillonita, pero también pudiera estarse manifestando infiltración del carbonato de calcio que aparece ocasionalmente relleno de fracturas en la toba Aguascalientes (ver discusión de contenido de carbonatos).

#### Grupo hidrogeoquímico 4.

Muestra 23, pozo 92

Muestra 22, pozo Centenario

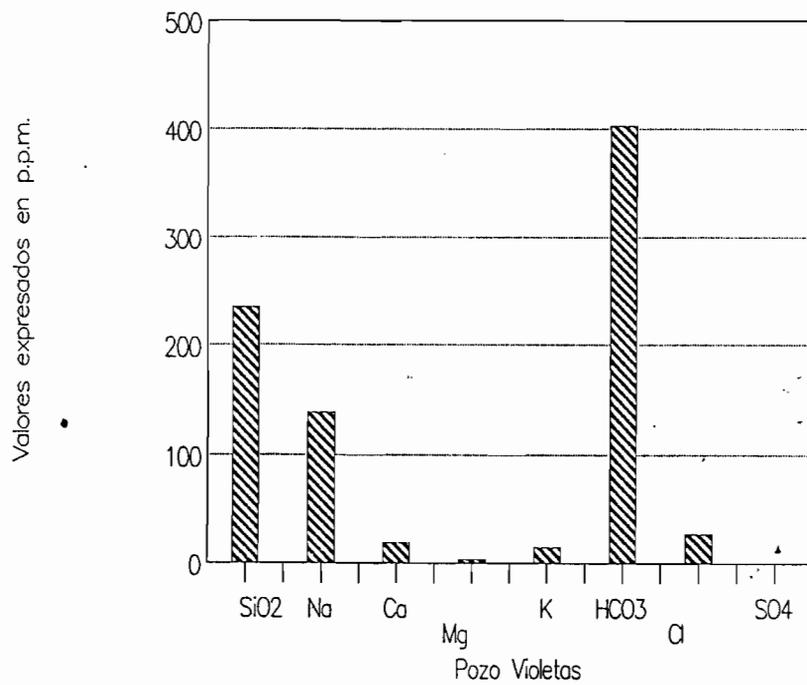
Muestra 4, pozo Violetas

Muestra 10, pozo Calvillito 1

#### CARACTERISTICAS AFINES A LAS TRES

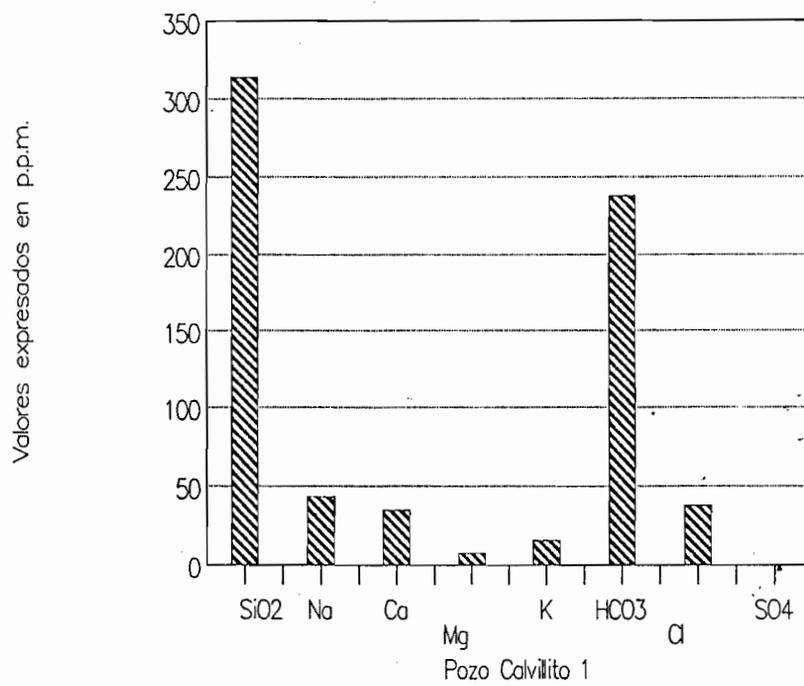
- Todas contienen más potasio que magnesio (menos la 10).
- Todas contienen más bicarbonato que sílice.
- Todas contiene más sodio que calcio.

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 4



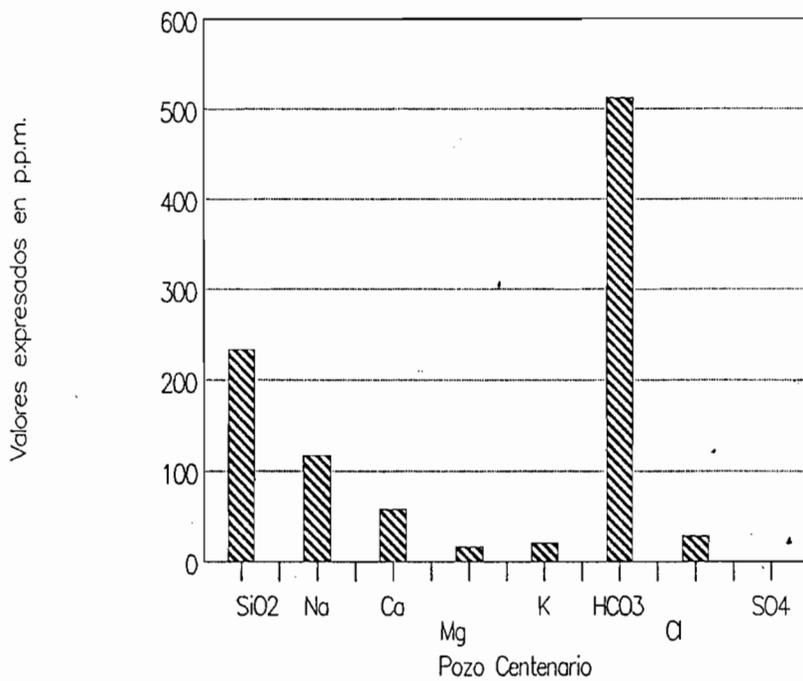
Grupo Hidrogeoquímico 4

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 10



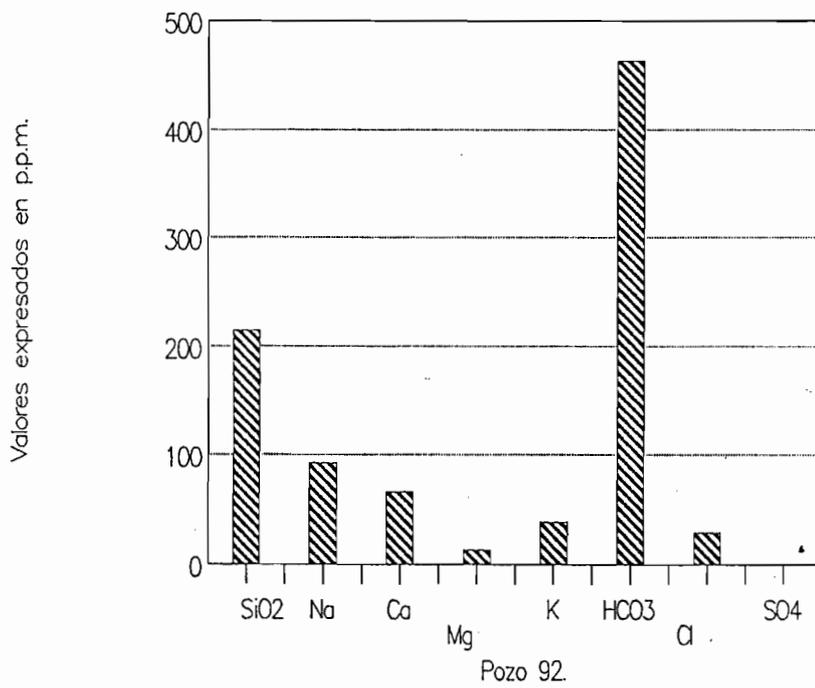
Grupo Hidrogeoquímico 4

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 22.



Grupo Hidrogeoquímico 4

PROPORCION QUE GUARDAN ENTRE SI  
LOS COMPONENTES DE LA MUESTRA 23.



- Sus gráficas manifiestan la misma relación en sus constituyentes que el diagrama de Garrels, excepto en el contenido de bicarbonato que es el doble que el de sílice en las muestras provenientes de la ignimbrita, y en el contenido de cloro que iguala los de sodio y calcio en la muestra 10.

Interpretación para este grupo:

El comportamiento de los diagramas de las muestras es el que más refleja un flujo en rocas riolíticas, similar a lo propuesto por Garrels, excepto en el contenido de bicarbonato que supera al de sílice.

A este respecto hay que mencionar que el  $\text{HCO}_3$  es con mucho el anión dominante en la mayoría de las aguas subterráneas, y que en medios de rocas volcánicas proviene predominantemente de la descomposición de los silicatos (Garrels, 1975). Por otro lado, considerando que las ignimbritas no tienen la homogeneidad de las lavas riolíticas, pues su constitución es el resultado de la solidificación integral de diferentes fases del magma (lava y volátiles) que les dió origen, es de esperar que el material argiláceo y vítreo que contienen al ser más alterable, dé como resultado aguas más enriquecidas en bicarbonato. Es conveniente recordar que la argilitización de muchos silicatos va acompañada de la formación de bicarbonato, y que incluso la devitrificación, que en el análisis petrográfico (anexo I) se observó ser muy persistente en la zona, puede dar como resultado la formación de arcillas (Kerr, 197). Cabe mencionar que Garrels (op. cit.) presenta también resultados del análisis de aguas que circulan en granitos, y la única diferencia con respecto a los flujos en riolitas estriba en que el contenido de bicarbonato es casi el doble del de sílice, tal como sucede con las muestras del presente grupo, lo cual podría demostrar el equilibrio antes propuesto con magmas ácidos.

Con lo anterior, se corrobora que las tres muestras obtenidas de pozos que explotan la Ignimbrita, están reflejando un flujo diferente del que circula en la Toba Zoyatal y en el aluvión y considerando que los principales procesos químicos mediante los cuales el agua adquiere su composición dominante ocurren en el suelo (donde se efectúa la recarga), las aguas que representan este flujo, aparentemente se están recargando en ignimbritas, y a través de los conductos que constituye su propio fracturamiento están circulando hacia las profundidades mayores. Ello lo confirma también la muestra 10 de este mismo grupo que a pesar de provenir de un pozo que explota el material tobáceo, está manifestando en sus S.T.D., temperatura, facies hidrogeoquímica, y proporción entre sus constituyentes químicos, que proviene del mismo tipo de flujo, posiblemente a partir del fracturamiento que caracteriza la zona en que se encuentra.

## SILICE

Generalmente no es de los elementos disueltos más importantes, debido a su baja solubilidad.

A temperaturas y pH normales en las aguas naturales es probable que se encuentre como ácido silícico monomérico ( $H_4SiO_4$ ) en parte disuelta y en parte coloidal, y solo una pequeña parte esté ionizada ( $SiO_4H_3^-$ ), aunque esta solo se presentan en cantidades apreciables a un pH > 9. El  $CO_2$  juega un papel importante inhibiendo el aumento del pH y limitando su solubilidad.

Los factores que promueven el incremento de la solubilidad del sílice son:

El aumento de temperatura y presión excepto cerca del punto crítico del agua ( $1000^{\circ}C$  y 9.7 kbar), (Siever, 1974).

La circulación del agua a través de rocas volcánicas.

La existencia de agua bicarbonatada sódica.

Un valor promedio para aguas subterráneas es de aprox. 25 p.p.m. Cuando la concentración varía arriba de 100 p.p.m., se pone de manifiesto la solubilidad del sílice amorfo.

El agua de la zona de estudio, registra valores considerablemente más altos de los que es normal encontrar en medios de rocas volcánicas, y fluctúan entre 214 y 334 p.p.m. El valor menor está representado por una de las muestras (23) que explotan la ignimbrita (y de hecho los dos valores que le suceden corresponden a las otras muestras de la ignimbrita), y el mayor es común a las muestras: 3 (aluvión del graben), 12 y 14 (aluvión Terciario).

Los contenidos más altos de sílice los presentaron las muestras 3, 8, 9, 10, 12, 14, 15, y 18 (correspondientes a los grupos hidrogeoquímicos 2 y 3 a excepción de la muestra 10), cuyos valores rebasan las 300 p.p.m. Estas muestras se caracterizan por presentar (a excepción de la muestra 14), las menores concentraciones de sólidos disueltos y corresponden al agua que circula principalmente a través de la Toba Zoyatal y el material aluvial, por lo tanto se pone de manifiesto un similitud entre el agua que se explota de las tobas y la que se explota del material aluvial, principalmente del Terciario. Esta similitud encuentra su explicación en el hecho de que el aluvión Terciario y la toba Zoyatal constituyen parte de una misma secuencia (ver

Estratigrafía), y además, en ellos el agua parece tener el mismo tiempo de residencia a juzgar por el rango de transmisividad que coincide en ambos (ver unidades hidrogeológicas).

En cuanto al valor de sílice tan alto, se explicó en el análisis del grupo hidrogeoquímico 3, que parece deberse al hecho de que el intenso fracturamiento que caracteriza los afloramientos de la toba Zoyatal, se encuentra relleno por un gel de composición silícea (ver descripción en Estratigrafía).

La presencia de este gel silíceo encuentra su explicación en la química coloidal del sílice, y al respecto Siever, 1972, indica que el sílice libre que cristaliza a temperaturas inferiores a 200 °C es común, apareciendo en variedades de sílice amorfo como gel, vidrio etc.

Por otra parte, la solubilidad de equilibrio puede ser confirmada por la precipitación del gel a partir de soles supersaturados y ha sido establecido por muchos investigadores (Alexander, Helston, Iler, 1954; Krauskopf, 1956, Okamoto, Okura y Goto, 1957) que la solubilidad del sílice amorfo es independiente del pH en el rango 2-9 y las únicas especies importantes abundantes se encuentran no disociadas.

Custodio, 1975, indica que la presencia de sílice en profundidades someras, es útil además para deducir la circulación del agua en los sistemas hidrotermales, ya que los flujos de agua ascendentes "tienden a depositar sílice si su temperatura desciende por debajo de los 125°C, mientras que eso no sucede con las aguas descendentes que pueden depositar travertino".

De esta manera, la presencia del gel silíceo que se encuentra persistentemente relleno fracturas puede estarnos indicando que:

-En tiempos pasados se tuvo un régimen de flujo ascendente, donde una comunicación constante del flujo en ignimbritas con el agua somera y a menor temperatura, provocó que se precipitara la sílice que traía en estado coloidal.

-Posteriormente, debido a que "estas especies no son persistentes por largos períodos geológicos ni ambientes de baja temperatura de modo que todas las formas de sílice amorfo encontrado en sedimentos modernos recristaliza en la naturaleza en un período muy corto de tiempo en escala de  $10^7$  -  $10^8$  años" (Siever, 1975), este sílice regresa al estado coloidal (el proceso coloide-gel es altamente reversible) en un sistema cíclico donde el agua se encuentra muy saturada por el mismo. De este modo, no se espera que las fracturas a grandes profundidades estén rellenas tal como lo están cerca de la superficie. Los altos valores que registran las muestras, se encuentran además, en aparente equilibrio con el contenido de bicarbonato, por su tiempo de residencia en un medio riolítico.

Por otra parte la muestra 10, incluida también en los altos valores de sílice registrado que acabamos de analizar, pertenece al grupo hidrogeoquímico 4 antes descrito; y presenta respecto a las otras tres muestras de su grupo, un fuerte contraste (aprox. de 100 p.p.m.) en el contenido de sílice. A diferencia de las muestras que acabamos de analizar, que caracterizan la facies hidróquímica de la toba Zoyatal, esta es la muestra que manifestó en el análisis de temperatura y en el de Garrels, que a pesar de ser extraída de la toba Zoyatal tiene una fuerte influencia del flujo profundo debido al intenso fracturamiento que caracteriza la zona de la cual proviene.

La explicación más congruente con los resultados que hasta ahora se han obtenido es la siguiente:

El agua que proviene del flujo en ignimbritas se descarga en la toba Zoyatal, cuyas fracturas se encuentran rellenas de gel silíceo y de acuerdo con Garrels (1985) "los geles silíceos se disolverán rápidamente en agua hasta alcanzar un valor de equilibrio. El equilibrio es obtenido rápidamente tanto entre sólido y solución como entre varias especies en solución". Esa puede ser la razón por la cual, el contenido de bicarbonato en esta muestra no excede al de sílice, como ocurre en las muestras del flujo profundo, ya que aquí tiene cierto tiempo de residencia en el acuífero que aparentemente le permite alcanzar el equilibrio con el contenido de bicarbonato del medio riolítico

Los valores intermedios de contenido de sílice le corresponden a las muestras 5 y 16, que corresponden al grupo hidrogeoquímico 1.

Los valores más bajos, como ya se mencionó antes, le corresponden a las muestras obtenidas de las ignimbritas y su comportamiento en cuanto a contenido de sílice, ya fué analizado en el grupo hidrogeoquímico 4.

Finalmente, el contenido de sílice en las muestras del área de estudio, proveen indicios muy importantes del grado de alteración que la roca puede tener a profundidad. Diferentes ensayos de laboratorio han demostrado que suspensiones gruesas de suelo o roca pulverizada riolítica, en agua destilada, disuelven rápidamente grandes cantidades de sílice a niveles comparables con aquellos encontrados en aguas subterráneas (Garrels, 1985). Y además, los valores que se encuentran en las muestras que nos ocupan, superan con mucho los normalmente registrados por aguas que circulan en rocas volcánicas. Por otra parte, el equilibrio químico del agua subterránea y suelo con el sílice, es presumiblemente controlado por la reacción caolinita-montmorillonita, que son los principales productos de alteración de las rocas feldespáticas, y que además tienen como producto de alteración asociado, al bicarbonato. Recordando que los contenidos más altos de bicarbonato obtenidos en la zona de estudio, corresponden al agua del flujo profundo (ignimbritas), y, aunado a lo anterior, el hecho de que la alta temperatura

promueve la solubilidad del sílice, es muy posible que la ignimbrita a profundidad se encuentre muy alterada; pues incluso los S.E.V. registraron resistividades anómalamente bajas, en algunos sitios donde los pozos han perforado la ignimbrita (de hecho en los cortes litológicos, a profundidades alrededor de 300m, la roca suele describirse como "ignimbrita muy alterada").

Las isoconcentraciones de sílice se presentan en el plano VI.4.

## BICARBONATO

El ión bicarbonato guarda una profunda relación con el gas CO<sub>2</sub>, con el CO<sub>2</sub> disuelto, con el CO<sub>3</sub><sup>=</sup>, y con el pH. Es el ión que le dá alcalinidad al agua junto con el carbonato, sin embargo en las muestras analizadas para el presente estudio, la alcalinidad del agua fué aportada completamente por el ión bicarbonato y ello fué debido a que el pH de todas las muestras es inferior a 7.5, y para que el ión carbonato precipite se requiere necesariamente un pH superior a 8.2.

Las concentraciones de bicarbonato que se encuentran en la aguas subterráneas generalmente deben su existencia al dióxido de carbono procedente de la atmósfera, del suelo, y a la disolución de las rocas carbonatadas. Las concentraciones normales oscilan entre 50 y 400 p.p.m. y este último extremo ya corresponde a acuíferos en rocas carbonatadas.

En las muestras analizadas para el presente estudio se detectaron contenidos de bicarbonato que oscilan entre 200 y 300 p.p.m. para la mayoría de las muestras, pero las muestras alineadas con la falla y que además están extrayendo agua de las Ignimbritas, presentan contenidos más altos de los que suelen considerarse normales en medios volcánicos. Sin embargo, como se ha demostrado en el análisis de los grupos hidrogeoquímicos de este subcapítulo, la proporción de los constituyentes químicos representa un equilibrio congruente con medios riolíticos entre el bicarbonato, el sílice y los cationes.

En las muestras donde el contenido de bicarbonato alcanza el doble del contenido de sílice, queda justificado con el análisis del grupo hidrogeoquímico 4, el equilibrio químico entre el bicarbonato y el sílice. Sin embargo, para el análisis de este inciso, se recurrió a valorar las proporciones entre el ión bicarbonato y el ión calcio, que marcan un equilibrio químico con calcita con el fin de determinar si podría existir un exceso de ambos iones que proviniera de la disolución de calcita. Esto se hizo mediante recopilación de diferentes análisis estadísticos de iones principales de acuíferos en caliza, con lo que pudo concluirse que:

Aún omitiéndose la existencia de sílice en el acuífero de estudio, el bicarbonato resultaría, en proporción, insuficiente para el contenido de calcio, debido al exceso de sodio que inhibiría la precipitación de calcita. Pero considerando las condiciones hidroquímicas reales, no existe exceso de calcio respecto al esperado por el medio litológico y su contenido apenas corresponde al que justifica el equilibrio con el sílice. Inclusive en el medio tobáceo, donde el contenido de calcio supera al de sodio, los cationes no llegan a alcanzar los valores de equilibrio con los silicatos del medio litológico en que se hallan, lo cual llevó a determinar anteriormente que el valor tan alto de sílice, deriva de la disolución del gel

silíceo, casi en la misma proporción que de los silicatos, de manera que, en caso de que algo del bicarbonato y calcio provinieran de la infiltración de agua superficial con calcita disuelta, la proporción es muy poca. Debe existir infiltración de soluciones de calcita, puesto que la Toba Aguascalientes llega a presentar contenido de carbonatos, pero aparentemente, el calcio se está fijando en las arcillas junto con el magnesio, a través de algún intercambio iónico pues, incluso el potasio llega a presentar fluctuaciones importantes y las condiciones físico-químicas que permiten la disolución del sílice, inhiben la disociación del bicarbonato, de manera que este se equilibra con los silicatos.

Por otra parte, cuando se habló del contenido de sílice, se explicó que existe incompatibilidad química entre la precipitación de sílice y la de carbonatos, a partir de aguas subterráneas, razón que puede explicar el que las muestras no registran contenido de carbonato.

En el área de estudio, se encuentran espesores de hasta 40 cm de caliche (calcreto), lo cual despertó gran interés desde el punto de vista de su origen, puesto que si las aguas subterráneas parecen no haberle dado origen debido a la incompatibilidad con su contenido de sílice, el origen de este podría estar en la superficie del suelo. La primera evidencia que se tiene es la de que se encuentra actualmente, como suelo calcáreo directamente sobre el material volcánico. Por otra parte, este caliche puede explicar el relleno de calcita en algunas fracturas de la Toba Aguascalientes.

Cabe recordar, que la única influencia de rocas calcáreas en la zona se encuentra al norte del área de estudio (Tepezalá), y que constituye tan sólo el 5 % del límite total de la subcuenca, pero que según la cartografía del INEGI, sus corrientes se están descargando hacia el oriente y hacia el norte del graben.

Goudie, en 1990, explica que el caliche es un tipo distintivo de cementación meteórica que generalmente es micrítica o microespatítica y que puede rellenar espacios porosos pero también pueden reemplazar y desplazar los originales.

Ocurren en la zona vadosa, usualmente como horizontes de suelo distintivos, o dentro, o justo debajo de la zona capilar (calcretos freáticos o de agua subterránea), pero algunos autores han restringido el término a horizontes prominentes de carbonato desarrollados solamente en el suelo donde constituyen horizontes cálcicos o petrocálcicos (Tucker y Wright, 1990).

Existen dos tipos principales de calcreto edafogénico, que son los de substrato no calcáreo y los de substrato calcáreo. Los controles en la distribución de ambos no son claros del todo pero factores como el clima, vegetación, y composición del material fuente parecen ser los más importantes. Su composición típica es

de Calcita, que aparentemente se precipita por la pérdida de agua por evaporación y evapotranspiración y la pérdida de  $\text{CO}_2$ , especialmente por requerimiento de las plantas.

En cuanto a las fuentes principales del carbonato, el material puede ser adherido a los perfiles como polvo disuelto y reprecipitado más abajo hacia zonas de alta tensión de humedad.

El caliche edafogénico se desarrolla en una serie de etapas con variaciones dependiendo de la naturaleza del sustrato, como se ilustra en la figura VI.5. que se explica a continuación:

A partir de un sustrato no calcáreo (A), el calcreto se desarrolla en una típica secuencia desde nodular a masivo y brechado. Para la etapa 4 el horizonte petrocálcico es usualmente impermeable y la subsecuente precipitación ocurre en la cima del horizonte desde aguas estancadas para dar un horizonte laminar. Con el tiempo esos horizontes aparecen brechados y carstificados. Esto es lo que se está viendo en la zona de estudio pues el caliche aparece sobre la superficie del suelo presentando continuidad lateral y estructura laminar, además de brechamiento en su superficie, en algunas porciones.

Eso no sucede en sedimentos carbonatados expuestos (B) donde la secuencia es similar pero los nódulos comúnmente no se desarrollan. Las acumulaciones de calcreto tienen lugar bajo la superficie del suelo, donde aparecen como motas, y no se aprecia continuidad horizontal.

Por lo tanto, el caliche en la zona de estudio, puede ser edafogénico y haberse formado a partir de sustratos no-calcáreos. Por otra parte, parece haberse estado formando, a lo largo del Reciente, en etapas que parecen marcar contrastes de condiciones climáticas, tal vez aridez, etc., puesto que actualmente se ve sobre la superficie, pero también llegan a verse franjas bajo la superficie que ya han sido cubiertas por material de acumulación.

Finalmente, la concentración del bicarbonato, puede también apoyar en el conocimiento del tipo de alteración que se está produciendo en el acuífero. Garrels, et. al., 1985, determinaron que a concentración de bicarbonato alrededor de 100 p.p.m., el  $\text{SiO}_2$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  y el pH son suficientemente altos como para permitir la precipitación de montmorillonita tanto como la de caolinita, y que reacciones adicionales proceden manteniendo el equilibrio con caolinita y montmorillonita. Dada la concentración tan alta que se tiene de bicarbonato y de sílice en la zona de estudio cabría esperar que se cuente con las condiciones necesarias de pH para que esto esté sucediendo.

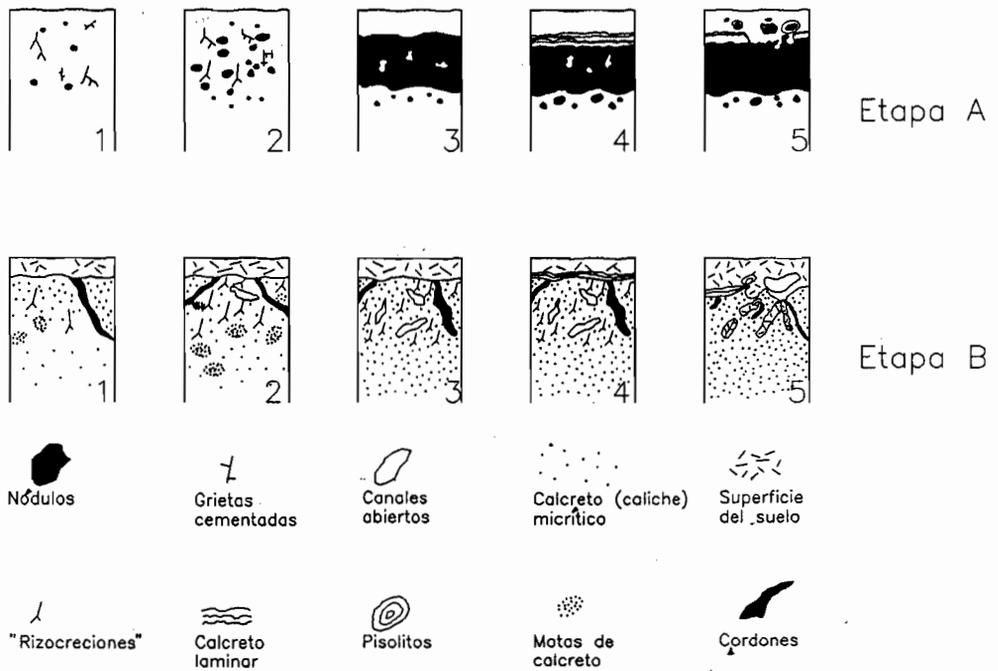


Fig. VI.5 Etapas de la Formación del Calcreto (Caliche) para los dos tipos de Origen Edafogénico:  
 A: a partir de un sustrato no calcáreo  
 B: a partir de un sustrato calcáreo

## SODIO

El usualmente alto porcentaje de plagioclasa es responsable de los altos porcentajes de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^+$  en las aguas.

Las sales que forma este catión son muy solubles y muy difíciles de precipitar. A diferencia del Ca y Mg no es constituyente fundamental formador de rocas, sin embargo el agua que circula a través de rocas volcánicas ácidas puede resultar muy enriquecidas en Sodio pues la principal fuente del mismo en las aguas subterráneas la constituyen la liberación de los productos solubles que tiene lugar durante la descomposición de los feldespatos plagioclasa, y en menor grado las arcillas que bajo ciertas condiciones pueden liberar cantidades importantes de sodio intercambiable. En presencia de calcio se presenta el fenómeno de cambio de bases de manera que la presencia de uno puede inhibir la precipitación de las sales del otro.

Lo anterior se está observando claramente en el presente estudio pues las muestras con más altos contenidos de Sodio son la 4, 22, y 23, con 138, 117.3, y 92 mg/l respectivamente. Como se recordará, pertenecen a la facies bicarbonatada sódica y pertenecen a los pozos que explotan las ignimbritas, que se encuentran más cercanas a la falla; además de coincidir con las temperaturas más altas y con las mayores concentraciones de bicarbonato. Por otra parte estas muestras tienen también los más bajos contenidos de calcio, y también los más bajos contenidos de sílice.

Alrededor de los 40 mg/l en contenido de sodio, se encuentran las muestras que le suceden a las anteriores en concentración y que corresponden a las muestras 10, 16, y 5. Las tres pertenecen a la facies bicarbonatada sódica. La primera a la zona fracturada que se describió en el grupo hidrogeoquímico 4, y las otras dos al graben, y probablemente están manifestando la influencia de la cercanía con la falla.

Las más bajas concentraciones corresponden a las muestras obtenidas de los pozos que extraen agua de la Toba Zoyatal y del Aluvial Terciario.

## CALCIO

Según Garrels, 1976, la fuente principal de calcio en las aguas naturales son los minerales de carbonatos que en la escala global contribuyen con 80% al calcio presente en los flujos de agua. Sin embargo localmente, en materiales de grano fino tales como ceniza volcánica, las aguas pueden estar enriquecidas en calcio más allá del equilibrio con los minerales primarios produciendo zeolitas a condiciones fisico-químicas determinadas. Esta opción puede ayudar a explicar los altos contenidos de calcio en la zona pues efectivamente la principal zona acuífera que se explota en el área está constituida por material volcánico fino, que si pudiera dar origen a la formación de zeolitas de las que Whitten y Brooks, 1972, afirman: " las evidencias sugieren fuertemente que son verdaderos productos hidrotermales y no el resultado de lixiviación de rocas primarias" Sus cationes presentes normalmente incluyen calcio y potasio.

La facies hidroquímica dominante, en la zona de estudio es la bicarbonatada cálcica que se distribuye en general en la zona de lomeríos y principalmente en los pozos que extraen agua de la Toba Zoyatal y del material aluvial Terciario. Una tendencia general (Plano VI.6) es el incremento de calcio hacia el occidente, si se omiten las excepciones de los pozos en ignimbritas.

## VI.6 EVOLUCION QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA

Según Doménico (1972), la evolución química del agua subterránea por lo general obedece a dos premisas fundamentales:

1) La concentración de materia mineral disuelta es directamente proporcional a la longitud del patrón de flujo y al tiempo de residencia del agua en el acuífero.

Este inciso permite corroborar los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, puesto que el flujo profundo que circula a través de las ignimbritas según lo manifestó la química del agua, demostró contener la mayor cantidad de sólidos disueltos, mientras que el flujo somero correspondiente tanto al agua de la toba como al agua del aluvión, poseen las concentraciones más bajas. Lo anterior puede deberse a que los flujos profundos en las ignimbritas, por su carácter regional, poseen un mayor tiempo de residencia además de estar circulando en un sistema que debido a las temperaturas y la velocidad con que circula el agua favorece la disolución de minerales de las rocas incrementando, como consecuencia, la concentración de sólidos en estas aguas. Por su parte, los flujos someros son de carácter local y por lo tanto, los tiempos de residencia son cortos en comparación con los flujos profundos

2) El tipo químico del agua subterránea en cualquier punto del sistema, está en función de la composición química de las rocas en ese punto del sistema, y a la calidad anterior del agua.

Se vió claramente con los resultados de la química que cuando el agua somera no tiene comunicación a través del fracturamiento con el flujo profundo, su composición química corresponde a la esperada por la litología en la que se encuentra, tal como sucedió con los grupos hidrogeoquímicos 2 y 3, mientras que cuando esta comunicación se manifiesta, la composición química presenta alteraciones con respecto al standard de su litología, tal como sucede en el grupo hidrogeoquímico 1, donde la calidad anterior del agua de las ignimbritas, logra modificarse un poco en cuanto a contenido de sodio en el aluvión del graben, pero no en cuanto a S.T.D.

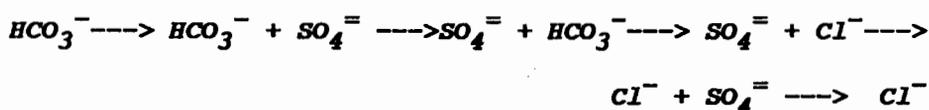
Flujo profundo.

Por su parte, Schoeller et. al., 1977, indican que el agua profunda circula muy lentamente y es muy difícil que sea reemplazada por otra agua, particularmente por agua infiltrada de la superficie, de modo que las rocas profundas, están menos sujetas a la lixiviación y retienen su agua por largo tiempo.

Este comportamiento se manifestó muy claramente en el agua proveniente del flujo profundo y que de acuerdo a sus constituyentes químicos podría estar circulando desde su infiltración a través de la ignimbrita, ya que su composición química manifiesta un equilibrio muy marcado con este tipo de medios litológicos.

Cuando no hay grandes pérdidas por evapotranspiración que afecten los procesos, es natural que la composición del agua cambie de tipo bicarbonatado en profundidades someras, a tipo clorurada conforme la profundidad se incrementa. La modificación de la composición química con la profundidad, sigue el patrón:

Viaje a lo largo del patrón de flujo----->



-----> Incremento en edad

Dicho patrón, describe la variación en la composición química que resulta de la concentración y que causa un zoneamiento vertical.

El contenido de bicarbonato en la zona de estudio, se incrementa considerablemente en el flujo profundo, a razón de 200 a 500 p.p.m., con respecto al agua somera, lo cual corrobora su mayor recorrido a lo largo del patrón de flujo, sin embargo, ni este, ni el flujo somero, presentan sulfato, y sus valores de cloro, no exceden el rango de las aguas meteóricas, por lo tanto son esencialmente aguas que se encuentran aún en las primera etapa del ciclo de evolución química.

#### Areas de recarga.

En un sistema hidrogeológico dado, un área principal de recarga generalmente tiene agua con menos sólidos disueltos que un área donde la recarga sea menor (Back y Hanshaw, 1966), por lo tanto, basados además en el esquema arriba ilustrado así, como en la transmisividad y el comportamiento químico de las muestras obtenidas de la Toba y el aluvión, se concluye que son aguas de reciente infiltración y representan además flujos locales con dominante influencia del agua meteórica, lo cual es confirmado por su contenido de cloro que se encuentra en el rango del agua de lluvia. Esto significa que constituyen las áreas principales de recarga y por ello, se recomienda la debida protección de las mismas.

## **VI.7 CALIDAD QUIMICA DEL AGUA**

De todas las muestras analizadas en ninguna se encontraron concentraciones que rebasen las normas internacionales para el consumo humano con respecto a los iones analizados. Sin embargo de acuerdo al ambiente geológico en que se presenta este sistema acuífero es posible que el agua contenga altos contenidos de flúor lo cual se justifica por la mineralización característica de la región así como por la alta afinidad geoquímica que guardan entre sí el Sodio y el flúor. Al respecto, Larsson et.al., 1985, menciona que los distintos criterios sobre calidad de agua potable, establecen un límite superior admisible de concentración de flúor que va de 0.6 a 1.7 mg/l (OMM, 1971). En algunas regiones es difícil que se cumplan estos requisitos. Tal sería el caso de la zona de interés al presente estudio puesto que al tratarse de rocas con importante contenido de sodio el flúor estará también presente, y posiblemente en cantidades más altas de las permisibles. Al respecto se recomienda un análisis del agua para determinar la concentración en flúor.

Así mismo de acuerdo con la geoquímica de las series radiactivas del Uranio y Torio, la naturaleza geológica de este acuífero hace casi segura la presencia de radionucleidos en el agua, tales como el Radio-226 y el Radón-222 que en cantidades mayores a 5 pCi/l es de alto riesgo para la salud.

Al respecto, Jaimes Palomera, 1991, menciona que es de esperarse que las aguas subterráneas disuelvan uranio, radio, y plomo de estratos y rocas con los que se encuentra en contacto. La concentración de radón encontrada para acuíferos en rocas ígneas y metamórficas es más alta que para cualquier tipo de acuífero. Los más altos valores, como es de esperarse, se han encontrado en rocas ígneas ácidas.

Por tal motivo, se hace indispensable, un estudio del agua y el suelo en la región, encaminado a detectar la concentración de actividad provocada por los radionucleidos.