



37-28

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**"COMPORTAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DEL
AGUA SUBTERRÁNEA EN LA ZONA NORTE
Y CENTRO DEL ESTADO DE MORELOS"**

**TESIS DE LICENCIATURA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOLOGO
P R E S E N T A
ELISEO VAZQUEZ SANCHEZ**

MEXICO, D. F.

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE DEL CONTENIDO

	Pág.
Capítulo	
I	
INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Información Previa	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodología de Trabajo	4
1.5 Agradecimientos	8
II	
RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	9
II.1 Resumen	9
II.2 Conclusiones	10
II.3 Recomendaciones	14
III	
DESCRIPCION FISICA DEL AREA	16
III.1 Localización	16
III.2 Vías de Comunicación	16
III.3 Población y Actividad Económica	18
III.4 Clima y Vegetación	19
III.5 Fisiografía	22
IV	
GEOLOGIA	24
IV.1 Geología Regional	24
IV.2 Geología Local	25
IV.2.1 Estratigrafía	26
IV.2.2 Geología Estructural	39
IV.2.3 Geomorfología	42
IV.2.4 Geología Histórica	45

V	HIDROLOGIA SUPERFICIAL	49
	V.1 Climatología	49
	V.2 Esgurrimientos Superficiales	52
VI	HIDROLOGIA SUBTERRANEA	54
	VI.1 Unidades Hidrogeológicas	54
	VI.2 Características Hidráulicas de los Acuífe-- ros	64
	VI.3 Características de Manantiales	67
	VI.4 Estimación Comparativa entre el Caudal de - Flujo Subterráneo en Medios Granulares - - (Qa1) y el Caudal Descargado en el Manan- - tial Las Estacas	69
	VI.5 Funcionamiento Hidrogeológico	72
VII	HIDROGEOQUIMICA	74
	VII.1 Introducción	74
	VII.2 Trabajo de Campo	74
	VII.3 Análisis Físico-Químicos	75
	VII.4 Características y Distribución de los pa- rámetros Físico-Químicos	77
	VII.5 Presentación de Resultados	93
	VII.6 Posible Origenes de los Iones Disueltos en las Aguas Subterráneas	95
	VII.7 Implicaciones Hidrogeológicas	108

INDICE DE TABLAS

(se encuentran al final de los capítulos)

Capítulo		Tabla No.
V.	Precipitación, Tempertaura, Evaporación y Evapotranspiración (Período 1971-1980)	V. 1
	Datos Hidrométricos	V. 2
VI.	Condiciones de los Tipos de Abertu ra	VI. 1
	Unidades Hidrogeológicas	VI. 2
	Parámetros Hidráulicos	VI. 3
	Características de Manantiales	VI. 4
VII.	Mediciones Física del Campo	VII. 1
	Resultados de los Análisis Físico-Químicos de Laboratorio	VII. 2
	Sistemas de Manantiales	VII. 3
	Clasificación Química de las Aguas Subterráneas (Facies Hidrogeoquímica)	VII. 4

INDICE DE FIGURAS

(Se encuentran al final de los capítulos)

Capítulo		Figura No.
III	Localización y Vías de Comunicación	III. 1
	Distribución de Climas	III. 2
	Área de Estudios y las Provincias - Fisiográficas del Centro de México	III. 3
IV	Tectónica del Caribe y del Pacífico	
	Centro	IV. 1
V	Isoyetas	V. 1
	Isotermas	V. 2
	Distribución de la Evaporación	V. 3
	Distribución de la Evapotranspiración	V. 4
	Cuencas y Subcuencas Hidrológicas	V. 5
VI	Sección Hidrogeológica	VI. 1
VII	Clasificación y Agrupación de los Di- ferentes Tipos de Agua Subterránea en	
	Diagramas de Piper	VII. 1
	Tipos de Agua según Piper	VII. 2

1. INTRODUCCION

El presente trabajo se refiere esencialmente a los aspectos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas de los principales manantiales de la región del Estado de Morelos. Esto tiene como fin, conocer de manera aproximada el comportamiento hidrogeológico de dicha región, ya que esta información es de suma utilidad en las futuras etapas de estudios de cuantificación y predicción de los recursos hidráulicos de la zona estudiada.

Por otra parte el área de estudio, por su crecimiento demográfico, agrícola, industrial y turístico, requiere de volúmenes de agua cada vez mayores para satisfacer esas demandas. Para ello, el recurso hidráulico subterráneo, ofrece perspectivas favorables por la alta potencialidad de la región en este renglón.

Es así, que el conocimiento del marco hidrogeológico como base de futuros estudios cobra gran relevancia.

I.1 Antecedentes

El Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional - Autónoma de México, dentro de sus actividades, desarrolla proyectos de investigación y proyectos externos relativos a las aguas subterráneas, como solución a la problemática que actualmente enfrenta el país para satisfacer sus necesidades de agua.

Como actividad complementaria a un proyecto externo, se llevó a cabo un proyecto de investigación relativo al comportamiento

físico-químico de las aguas subterráneas de los principales - manantiales de la parte septentrional y meridional del Estado de Morelos; con la finalidad de conocer el posible efecto de la recarga en las Sierras Chichinautzin, Nevada y Zempoala. De ese proyecto de investigación se derivó el presente trabajo como base para tesis profesional.

1.2 Información Previa

La situación de la información disponible en el área - de estudio y sus alrededores es la siguiente:

Dentro de los trabajos geológicos más completos y de gran calidad son los llevados a cabo por C. Fries (1960 y 1964), los cuales culminaron con la realización de la carta geológica del Estado de Morelos escala 1:100 000, esta cartografía abarca la mayor parte del área en estudio. Por otro lado se tienen los trabajos geológicos realizado por C. Schalaepfer (1968), cuya cartografía escala 1:100 000 comprende la porción septentrional de la zona en estudio. Mooser (1975), realizó trabajos geológicos de la Cuenca de México y zonas colindantes, en las cuales hace mención a la parte septentrional de la región estudiada. A. L. Martín del Pozzo (1980 y 1982), ha realizado trabajos referentes al volcanismo de la Sierra Chichinautzin.

En cuanto a los estudios geomorfológicos más completos se tiene los llevado a cabo por el Dr. L. Hubp (1982), que comprenden al sector sur de la Cuenca de México y parte de la porción septentrional de la región estudiada.

A pesar de que existen los trabajos hidrogeológicos de S.A.R.H. (Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Cuernavaca en -

el Estado de Morelos 1980 y Estudio Geohidrológico Preliminar - de la zona de Cuautla y Yautepec, Estado de Morelos 1981), Servicios Geológicos S.A. (Estudio Geológico y Geohidrológico del Valle de Cuernavaca, Mor. 1970) y de Lesser J.H. (Determinación del Coeficiente Relativo de Infiltración para la Vertiente Sur de la Sierra de Chichinautzin 1961), no se ha definido claramente el funcionamiento hidrogeológico de la región, ya que en primer lugar se trata de un sistema muy complejo. Es por lo que en la presente tesis profesional se pretende aclarar en parte este funcionamiento, haciendo uso de la información hidrogeoquímica de manantiales obtenida del Instituto de Geofísica de la UNAM, así como de otros datos disponibles.

1.3 Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar con este trabajo son:

a) Conocer las propiedades físico-químicas del agua subterránea en los principales manantiales de la parte septentrional y meridional del Estado de Morelos.

b) Determinar la distribución espacial de las principales familias de agua en el área considerada, en relación con el sistema hidrogeológico que representa y

c) Establecer el comportamiento hidrogeológico del área por medio de la caracterización físico-química del agua subterránea.

I.4 Metodología de Trabajo

La metodología aplicada para elaborar la presente tesis profesional, fué como se describe a continuación:

I.4.1 Recopilación de Información

Esta etapa del trabajo tuvo como finalidad recopilar información disponible del área de estudio y sus alrededores; referente a cartografía topográfica, geológica e hidrogeológica, así como de estudios geológicos e hidrogeológicos. El tipo y el empleo de la información obtenida se reseña a continuación. Se obtuvo información de las siguientes cartas: topográfica clave E14-5, hidrogeológica de aguas superficiales clave E14-5, hidrogeológica de aguas subterráneas clave E14-2, todas escala 1:250000 y editadas por el INEGI (1983). También se obtuvo información de las cartas geológicas escala 1:100000 (hoja Cuernavaca clave --140-h(C) y hoja México clave 140-h(5)), elaboradas por C. Fries (1964) y por C. Schiapfer (1968) respectivamente y ambas editadas por el Instituto de Geología de la UNAM.

Además se obtuvo información de los diferentes estudios geológicos e hidrogeológicos realizados en el área de interés, los cuales se consignan en el apartado de la bibliografía.

En base a la información recopilada se integró un plano geológico preliminar escala 1:100000, fundamentado principalmente en la cartografía de C. Fries (1964) y Schiapfer (1968). Del estudio del comportamiento físico-químico de los principales manantiales del Estado de Morelos, realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM, se utilizó la información de resultados de -

los análisis físico-químicos de 11 muestras de agua, 1 del lago de Tequesquitengo y las 10 restantes de manantiales.

1.4.2 Selección de los Puntos de Muestreo

Para seleccionar los puntos de muestreo se consideraron tres aspectos:

- a) Distribución de los manantiales en los distintos ambientes geológicos de la región.
- b) Importancia de los caudales descargados en manantiales.
- c) Obtener un muestreo representativo de la región en estudio.

Para lograr esto se revisó la información sobre la localización y caudales descargados por los diferentes manantiales, en las cartas hidrológicas de aguas superficiales y subterráneas ya mencionadas. Posteriormente se ubicaron estos manantiales en el plano geológico preliminar, observando que la mayoría de los manantiales se encuentran asociados a la unidad volcánica del Grupo Chichinautzin, a las rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos, y a los materiales clásticos aluviales. En base a éste análisis se definió que los puntos más representativos para la toma de muestras, son los que se presentan en el plano hidrogeológico anexo.

I.3.3. Trabajo de Campo

Con base en el plano geológico preliminar se realizaron una serie de visitas de inspección al campo, con el objeto de verificar las unidades litológicas, características topográficas, geomorfológicas, estructurales y estratigráficas de la región. Simultáneamente se levantó información para cada unidad litológica referente a sus características granulométricas, tipo, grado y materiales resultantes del intemperismo, grado de compactación, presencia de capas impermeables, características de los tipos de abertura atendiendo a su origen, modificación, forma, abundancia, tamaños comunes, persistencia y principalmente a su grado de interconexión.

Dentro de esta misma actividad se realizó la toma de muestras de agua para análisis físico-químicos en laboratorio. La metodología y detalles del muestreo se comentan ampliamente en el capítulo de hidrogeoquímica. Conjuntamente al muestreo se midieron las siguientes propiedades de las aguas: concentración de hidrogeniones (PH) mediante el método colorimétrico, -- conductividad eléctrica (C.E) por medio de un conductivímetro portátil y la temperatura (T) a través de un termómetro de mercurio.

También en los trabajos de campo se midieron los caudales suministrados por los diferentes manantiales y se determinó la composición litológica en donde brotan.

I.3.4 Interpretación de los Datos de Campo y Gabinete

Para lograr esta interpretación primeramente se integró y analizó la información obtenida de las actividades ante--

rios de la siguiente manera:

De la información geológica se definió la estratigrafía, geología estructural, geomorfología y la evolución geológica de la región. También se elaboró un plano geológico base y simplificado para su mejor empleo. De la información hidrológica se definieron las unidades acuíferas y acuitardos, las características hidráulicas de los acuíferos, las direcciones de flujo subterráneo, las zonas de recarga y descarga de los sistemas acuíferos y las características de los manantiales muestreados. -- También se elaboró el plano hidrogeológico basado en el plano geológico previamente formado. Una vez integrado la información geológica e hidrogeológica se combinaron e interpretaron para establecer el funcionamiento hidrogeológico de la región.

La integración de la información hidrogeoquímica consistió en el procesamiento de los resultados de los análisis físico-químicos de los diferentes manantiales muestreados. Para ello se calcularon los porcentajes en meq/l de cada uno de los resultados con el fin de graficarlos en los diagramas de Stiff y Piper. Finalmente se realizó la interpretación de los datos hidrogeoquímicos con lo que se complementó y apoyó el modelo de funcionamiento hidrogeológico del área estudiada.

I.5 Agradecimientos

Agradezco al Ing. Adrián Ortega G. por la propuesta del tema de tesis y por la acertada dirección de la misma, igualmente al Instituto de Geofísica de la UNAM por la ayuda y la facilitación de la información para la elaboración del presente trabajo, al personal del laboratorio de química-analítica del Instituto de Geofísica, quienes realizaron los análisis químicos. También agradezco las observaciones técnicas y de redacción de la presente tesis, hechas por los ingenieros Alejandro Guzmán A., Carlos Rivera V., Dionisio Valdez, Enrique Espinoza A. y en especial al Ing. Héctor L. Macías G.

Al compañero Frasto Sánchez G. por la ayuda aportada en los trabajos de campo y a todos aquellos que indirectamente colaboraron para la realización de mi tesis profesional.

II. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

II.1 Resumen.

La parte meridional del área en estudio se encuentra localizada en la región septentrional de la subprovincia fisiográfica denominada del Balsas-Mexcala; la cual pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur. (Raíz 1959 en Fries 1960). Mientras que la parte septentrional y oriental comprende la zona más meridional de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico.

El marco geológico de la región estudiada, está caracterizado por: sedimentación marina, deformación Laramídica, volcanismo del Eje Neovolcánico y por sedimentación clástica continental.

En base a la interpretación de la información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de 10 manantiales, se establece que las zonas más importantes de recarga de los diferentes acuíferos de la región, por infiltración del agua de lluvia y de los deshielos, ocurre en andesitas y riolacitas fracturadas de la Sierra Nevada y Zempoala, en andesitas y basaltos fracturados, y en escorias de la Sierra Chichinautzin. Otras áreas de recarga de menor proporción es la que se lleva a cabo directamente sobre depósitos granulares permeables de valles y llanuras de la región.

También se reconoció que existe un flujo de agua subterránea -- de reciente infiltración (meteorical, que ha circulado en rocas basálticas de alta permeabilidad del Grupo Chichinautzin, con una dirección de flujo, controlada por el patrón estructural (frac-

turas y derrames lávicos) y cuya manifestación es en manantiales producto por cambios de permeabilidad.

De la misma manera existen flujos de agua subterránea en conglomerados de la Formación Cuernavaca, con una dirección de flujo de norte a sur. En depósitos aluviales, con un movimiento de flujo de norte a sur en la región de Yautepac y de noreste a suroeste en la región de Cuautla. En conglomerados calizos y depósitos yesíferos del Grupo Balsas, con una manifestación superficial, probablemente controlada por el patrón estructural (fallas). Y en rocas carbonatadas y depósitos anhidríticos de las formaciones Cuautla y Morelos, con un comportamiento y evidencia superficial (manantiales), controlados estructuralmente (fallas, fracturas, planos de estratificación, etc.).

Igualmente se estableció una continuidad hidráulica entre las rocas volcánicas del Grupo Chichinautzin y las rocas carbonatadas de la formación Cuautla y Morelos.

II.2. Conclusiones

Las conclusiones que se obtuvieron del presente trabajo son las siguientes:

1a. Los rasgos litológicos, estratigráficos, estructurales y geomorfológicos, que influyen en el comportamiento del agua subterránea y superficial, están dados por una evolución geológica caracterizada por una secuencia marina cretácica deformada y afallada, con estructura anticlinal, sinclinal y defosas tectónicas rellenas con depósitos clásticos continentales del Terciario, por volcanismo del Eje Neovolcánico y por sedimentación clástica continental del Cuaternario y Reciente.

2a. Los principales acuíferos son: conglomerados de la Formación Cuernavaca, depósitos piroclásticos del valle de Amecameca, materiales clásticos continentales de valles y llanuras, basaltos y escorias basálticas del Grupo Chichinautzin, y rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos.

3a. Las unidades hidrogeológicas que se comportan como acuitardos son las siguientes formaciones: Xochicalco, Mexcala, Tepoztlán, Iztaccíhuatl, Cuayuca, Riolita Tilzapotla, Rocas Volcánicas del Terciario Medio, así como los grupos: Balsas, -- Buenavista e Ixtlilco y la Diorita Xalostoc, el Granito Colotepec y la Granodiorita Jonacatepec.

4a. En la región estudiada, los trabajos geohidrológicos realizados con anterioridad, han sido enfocados especialmente a la formación Cuernavaca y a los depósitos aluviales. De esos estudios se deriva que el coeficiente de transmisibilidades muy variable (1 a $98 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$). Y un coeficiente de almacenamiento de 0.01 a 0.04.

5a. Las direcciones de movimiento del agua subterránea son en la llanura de Cuernavaca de Norte a Sur, en la de -- Cuautla de noreste a soroeste y en la de Yautepec de norte a -- sur, en el valle de Amecameca son hacia el poniente, sur y norte.

6a. La alta permeabilidad debida al fracturamiento y disolución de los acuíferos del Grupo Chichinautzin y de las -- formaciones Cuautla y Morelos, es manifestada por los considera**bles** caudales descargados en manantiales.

7a. De la interpretación de la información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica, se concluye que el mecanismo de recarga y descarga de los acuíferos es el siguiente:--

la recarga principal ocurre en rocas basálticas y piroclásticas de la Sierra Chichinautzin, y en andesitas y riocitas de la Sierra Nevada y Zempoala. Otras áreas de recarga de menor proporción es la que ocurre directamente en depósitos granulares permeables de valles y llanuras. La descarga natural ocurre principalmente por manantiales.

ba. De los análisis físico-químico de las aguas subterráneas se concluyen que existen los siguientes sistemas de manantiales.

Sistema I; manantiales (Cocoyoc, El Almeal, Las Tazas y Chapultepec) asociados a rocas basálticas del Grupo Chichinautzin, caracterizados por los valores físico-químico más bajos.

Sistema II; manantiales (Agua Hedionada y Oaxtepec) en rocas basálticas del Grupo Chichinautzin, caracterizados por los valores físico-químico más altos.

Sistema III; manantiales (Palo Bolero, Atotonilco y Las Estacas) que brotan en calizas de las formaciones Cuautlay Morelos, con valores intermedios de sus propiedades físico-químicas.

9a. Las características físico-químicas de las aguas subterráneas de los manantiales del sistema I, manifiestan - - aguas de reciente infiltración que han circulado en rocas basálticas de alta permeabilidad del Grupo Chichinautzin. Véase fig VI.I.

10a. Los parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas de los manantiales del sistema II, reflejan un flujo subterráneo de estratos profundos y posiblemente en conglomerados calizos y depósitos yesíferos del Grupo Balsas.

11a. Las propiedades físico-químicas de las aguas -- subterráneas de los manantiales del sistema III, no manifiestan la alta permeabilidad por fracturamiento y disolución de los -- acuíferos carbonatados de las formaciones Cuautla y Morelos, de bido a su alta concentración de sólidos totales disueltos y a -- que manifiestan una mezcla de aguas subterráneas.

12a. Conociendo la composición litológica de las unidades estratigráficas de la región estudiada, se concluye que -- dicha mezcla es producto de aguas subterráneas que han circula-- do en conglomerados y yesos de Grupo Balsas, en calizas, dolo-- mías y anhidritas de las formaciones Cuautla y Morelos y en ro-- cas volcánicas del Grupo Chichinautzin. Véase Fig. VI.I.

13a. Debido al gran afallamiento registrado en la zona de estudio, la manifestación superficial de los flujos de -- agua subterránea del sistema II y III, es por medio de un con-- trol estructural. Véase Fig. VI.I.

14a. También es probable que las altas concentracio-- nes de sulfatos, los contenidos de azufre ($S^{=}$), los relativos -- altos contenidos de B, Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , F^{++} y F^{-} , y las altas tem-- peraturas de las aguas subterráneas del sistema II, indiquen la evidencia de una actividad magmática.

15a. Con la información obtenida y procesada se postula la siguiente tesis:

Existe una continuidad hidráulica entre las rocas volcánicas -- del Grupo Chichinautzin y las rocas carbonatadas de las forma-- ciones Cuautla y Morelos, a través de un flujo subterráneo posiblemente regional y controlado por el patrón estructural. Véa-- se Fig. VI.I.

II.3. Recomendaciones

1a. Es de interés realizar análisis de agresividad e incrustabilidad en las aguas subterráneas de los manantiales -- del sistema III. Estos análisis deberán realizarse para calcita, yeso, anhidrita y dolomita, con el objeto de obtener otro -- criterio adicional al de la mezcla de aguas, que permita esta-- blecer la ausencia de saturación de la calcita de agua subte-- rránea proveniente de las unidades hidrogeológicas Cuautla y -- Morelos.

2a. Realizar estudios de trazadores principalmente -- químicos con el objeto de: comprobar la alta permeabilidad y la -- dirección de flujo subterráneo en el acuífero basáltico del Gru -- po Chichinautzin; verificar la alta permeabilidad y conocer la -- dirección de flujo del agua subterránea en los acuíferos carbo -- natados de las formaciones Cuautla y Morelos; y comprobar la co -- municación hidráulica, establecida en el presente trabajo, en -- tre estos dos tipos de acuíferos.

3a. Llevar a cabo análisis de bacterias anaeróbicas -- en las aguas subterráneas de la región, con el fin de conocer -- si existe una reducción de sulfatos en los manantiales de Palo -- Bolero, Agua Hedionda y Oaxtepec, por acción bacteriana.

4a. Establecer un control hidroestratigráfica, como -- también la realización de pruebas de bombeo más periódicas, en -- los distintos pozos de la región; así como la planeación de las -- instalaciones de estaciones piezométricas de multiniveles.

5a. Actualizar los balances de agua subterránea y -- promover la instalación de hidrógrafos de mediciones continuas, -- tanto en los principales manantiales, como en los pozos y escu --

rrimientos superficiales.

6a. Debido a que las formaciones marinas Cuautla y Morelos, se comportan como acuíferos de alto rendimiento es recomendable ampliar la información hidrogeológica de estas unidades.

7a. Ampliar los puntos de muestreo tanto en pozos y en manantiales, siguiendo el criterio que se siguió en el presente trabajo, así como realizar un monitoreo más continuo de este muestreo.

8a. Realizar análisis isotópicos con el fin de comprobar las zonas de recarga, la comunicación hidráulica entre los acuíferos y los orígenes de las aguas subterráneas de la región estudiada.

III. DESCRIPCION FISICA DEL AREA

III.1. Localización

La región descrita en el presente trabajo está situada en la parte centro meridional de la República Mexicana. Está limitada por las coordenadas geográficas 18°30'00" a 19°10'00" de latitud norte y 98°40'00" a 99°20'00" de longitud oeste - - (véase figura No. III.1). Comprende una área total de 5180 - - Km², de la cual la mayor parte se ubica en el Estado de Morelos, al noreste y noroeste la zona estudiada comprende parte del Estado de México, al sureste y oriente abarca una pequeña parte - del Estado de Puebla y por último al norte comprende una porción de la parte sur del Distrito Federal.

III.2. Vías de Comunicación

La zona de estudio está bastante bien comunicada tanto por vía terrestre como aérea, por medio de carreteras pavimentadas, ferrocarriles y aeropuertos (véase figura III.1).

III.2.1. Carreteras

Existen dos carreteras federales pavimentadas que corren paralelamente entre sí desde la Ciudad de México hasta la Ciudad de Cuernavaca. La más importante es la cuota, autopista México Cuernavaca (No. 95) de cuatro carriles que continua has-

ta la Ciudad de Iguala Gro. La otra carretera es la libre México-Acapulco (No. 98) que en el tramo Cuernavaca-Puente de Ixtla atraviesa paralelamente con la otra carretera la porción occidental del área. La carretera federal de cuota México-Cuautla (No. 115) es un ramal de la autopista México-Cuernavaca, que se desprende de esta en el kilómetro 71, pasando por Tepoztlán, -- Oacalco y Oaxtenec. Otra carretera federal libre (No. 115) es la que inicia en la Ciudad de México, que pasa por Amecameca y finaliza en Cuautla.

Existen otros caminos federales de importancia y son: la carretera libre México-Oaxaca (No. 160) que atraviesa la parte oriental de la zona en el tramo Cuautla-Izúcar de Matamoros, la carretera libre (No. 56) que parte de Alpuyec a Ixtapan de la Sal y la carretera cuota Cuernavaca-Cuautla (No. 138) que pasa por Tejalpa, Yautepec y Cocoyoc.

Varias poblaciones importantes están intercomunicadas a través de las siguientes carreteras federales: Cuernavaca-Tepoztlán (No. 198), Yautepec-Oacalco (No. 34) y la carretera -- Tlacotepec-Axochiapan (No. 115). Las carreteras estatales son: Tejalpa-Zacatepec, Yautepec-Jojutla (No. 28) y la de Alpuyec a Jojutla (No. 1).

III.2.2. Vías Ferreas

El eje principal ferroviario es el que cubre el trayecto México-Estación Balsas y que toca los siguientes puntos del área: Tres Cumbres, Cuernavaca, Jiutepec, Zacatepec y Puente de Ixtla. Cuautla se comunica con la Ciudad de México vía Ozumba-Amecameca y con la Ciudad de Puebla vía Izúcar de Matamoros. - Un ramal de vía angosta que parte de Cuautla, va hacia Yautepec

en donde vira hacia el sur pasando por Tlaltizapán, Jojutla y -
Puente de Ixtla.

III.2.3 Aeropuertos

Existen pistas de aterrizaje que permiten las operacio-
nes de avionetas y aviones, únicamente de corto alcance. Estos
aeropuertos se encuentran situados en: Cuernavaca, Cuautla, Te-
quesquitengo y Puente de Ixtla.

III.3 Población y Actividad Económica

III.3.1 Población

Según los datos del censo de 1980, la región descrita-
tiene una población aproximada de 960314 habitantes, distribui-
dos en los siguientes municipios principales: Amecameca con -
31621, Cuernavaca con 232 355, Cuautla con 94101, Emiliano Za-
pata con 20977, Jojutla con 44902, Puente de Ixtla con 34810, -
Temixco con 45417, Tepoztlán con 19122, Tlaltizapán con 29302,-
Tlalquiltenango con 24136, Yautepec con 44026 y Zacatepec con -
31354. La población económicamente activa según el censo de --
1980, es en el Estado de Morelos de 303738.

III.3.2 Actividad Económica

A continuación se presentan las principales activida--

des económicas de la región en función del total de los ingresos aportados. Parece ser que los mayores ingresos surgen de las industrias manufactureras, en las cuales sobresale el complejo Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (C.I.V.A.C.), en el cual se han establecido empresas fabricantes de productos químicos, farmacéuticos, plásticos, maquinaria y herramientas metálicas, aparatos eléctricos, textiles, instrumental médico, muebles, zapatos etc. También se incluyen otras industrias fuera de C.I.V.A.C. como son: molinos de trigo, despepitadoras de algodón, plantas de cemento y cal, industria azucarera en las cuales destacan los ingenios de Zacatepec, Oacalco, Casasonoy Cuautla. En segundo lugar está la producción agrícola, con un total de 146 128 has cultivadas, de estas 52138 son de riego y 93990 de temporal según censo de 1980. El tercer sitio está ocupado por la industria ganadera.

El volumen de producción minera en toneladas para el año de 1984 en el Estado de Morelos es de 4 tons de Cu, 3 tons de Au, 1073 Tons de Ag y 72 tons de Pb. También existe la producción de yeso, caliza y otros materiales para la elaboración del cemento portland y para la cal hidráulica.

La industria turística es de considerable importancia para la vida económica de la región. Las artes y oficios representan otra fuente de ingresos; pudiéndose citar la orfebrería, tejidos y cestería entre otros.

III.4 Clima y Vegetación

Los datos del clima y vegetación del área en estudio se obtuvieron de las síntesis geográficas de los Estados de Morelos, Puebla y México, editadas por la S.P.P. (1981).

El clima que predomina en el área es el cálido y rigido en las zonas bajas. En menor grado predomina el clima de tipo-semicálido en una franja que va de este a oeste (véase figura - III.2). El clima templado se distribuye en la zona norte y se localiza en las partes altas de los valles. Los climas semi-fríos se concentran en las partes más altas de las Sierras de Zempoala y Chichinautzin, y en las partes medias de la Sierra Nevada. Los climas fríos se encuentran en las cimas de los volcanes del Popocatepetl e Iztaccíhuatl.

A continuación se presentan las variables climatológicas más importantes según la clasificación de climas de Köpen, así como las asociaciones vegetativas encontradas en el área de estudio.

Grupo de Climas Cálidos

Subgrupo de Climas Cálidos

Este clima se caracteriza por tener una temperatura -- media anual mayor de 22°C, se encuentra asociado a comunidades vegetativas como es la selva baja y los pastizales. Este tipo de clima presenta una variante representado por el clima cálido subhúmedo A(wo)(w), que es el más húmedo, con lluvias en verano y con porcentaje de lluvia invernal menor de 5, la precipitación media anual fluctúa entre 800 y 1000 mm, la temperatura media anual es de 22°C, la precipitación máxima se presenta en el mes de septiembre, y la mínima en los meses de febrero, marzo y diciembre, la temperatura más alta se registra en el mes de mayo, y la mínima en enero y diciembre.

Subgrupo de Climas Semicálidos

Este clima tiene una temperatura media anual entre -- 18° y 22°C, está asociado a comunidades vegetativas del tipo -- chaparral, matorral subtropical y pastizal. Este clima presenta la variante del clima semicálido subhúmedo A(c) (w). Véase figura No. III.2, el cual presenta una precipitación media -- anual entre 800 y 1500 mm, con su máxima incidencia en el mes -- de junio, y la mínima en diciembre y febrero, la temperatura -- máxima se registra en abril y mayo, y la mínima en enero y diciembre.

Grupo de Climas Templados

Subgrupo de Climas Templados

Este clima presenta una temperatura media anual entre 12 y 18°C, está asociado con bosques mixtos de pino, encino y -- pastizal. Presenta una variante que es el clima templado subhúmedo C(W2) (w), el cual presenta una precipitación media anual -- mayor de 800 mm, con su máxima incidencia en el mes de agosto, -- y la mayor en febrero y diciembre; mientras que la temperatura -- media anual oscila entre 12 y 18°C.

Subgrupo de Climas Semifríos

Presentan temperaturas medias anuales menores de 16°C, se encuentra asociado con bosques y praderas de alta montaña. -

Este clima presenta dos variantes:

a) Clima semifrío húmedo C(E) m (W). Véase figura -- No. III.2, el cual tiene una precipitación media anual alrededor de 1200 y una precipitación del mes más seco de 40 mm.

b) Clima semifrío subhúmedo C(E) (W₂) (w), su precipitación media anual fluctúa entre 1000 a 1500 mm.

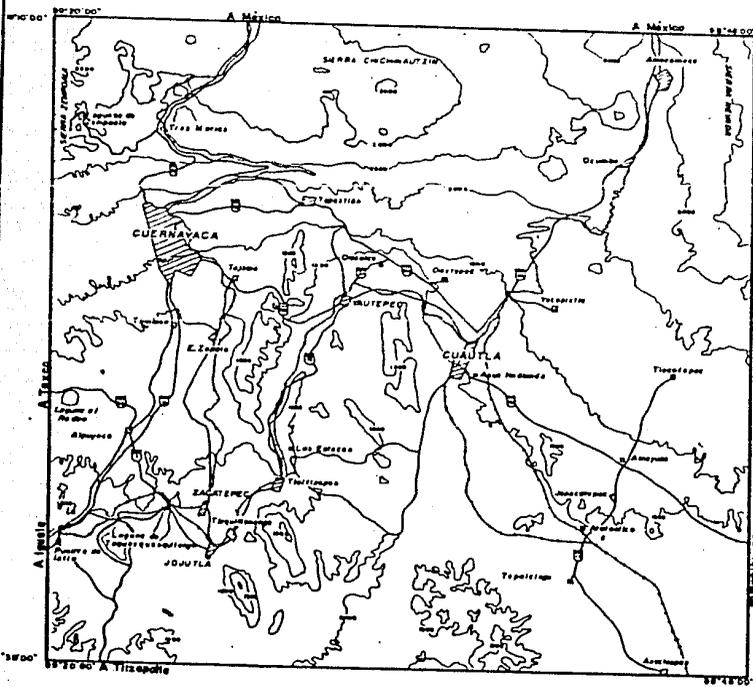
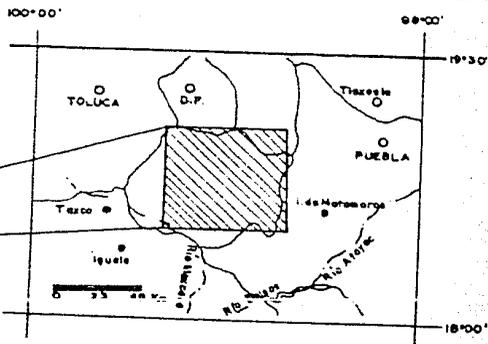
Grupo de Climas Fríos y Muy Fríos

Subgrupo de Climas Fríos

Este tipo de clima presenta una temperatura media del mes de mayo menor de 6.5°C, está asociado a vegetación del tipo tundra volcánica formada exclusivamente de plantas herbáceas. - Presenta una variante que es el clima frío E (T) H, el cual presenta temperaturas del mes más frío menores de 0°C, y con una precipitación media anual oscilando entre 1600 y 1800 mm.

III.5 Fisiografía

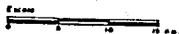
La región descrita en el presente trabajo se encuentra en el borde septentrional de la subprovincia denominada Cuenca del Balsas - Mexcala; la cual pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (Raíz 1959 en Fries 1960). Donde las serranías con una orientación preferencial norte-sur alcanzan alturashasta del 1800 m.s.n.m. Además la parte septentrional y oriental del área estudiada comprende una porción de la -



EXPLICACION

Área de Estudio
 Límite Estatal.
 Río

Cruce a Pastuán
 Carretera Federal Estatal
 Pasadizo
 Cerro de gran masa



UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
Platón Locación y Vías de Comisión	
Escala Vertical: 52x200	1988

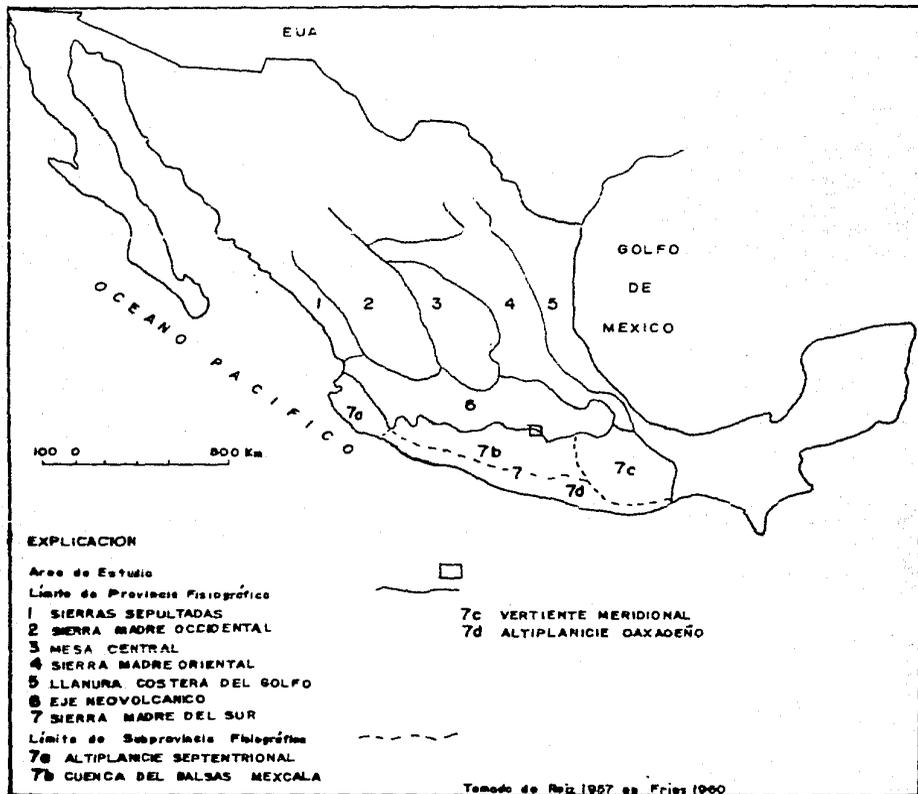


Fig. III.3 Area de estudio y las Provincias Fisiográficas del centro de México

zona más meridional de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico. Véase figura No. III.3, en donde se extiende la Sierra Chichinautzin con orientación preferencial este-oeste y con alturas hasta de 3690 m.s.n.m., la vertiente occidental de la Sierra Nevada con una orientación norte-sur y con alturas de 5465 y 5320 m.s.n.m. en los volcánes del Popocatepetl e Iztaccíhuatl respectivamente. También en la misma zona se presenta la parte sur-oriental de la Sierra Zempoala con una orientación preferencial norte-sur y con alturas hasta de 3690 m.s.n.m.

IV. GEOLOGIA

El marco geológico de la zona de estudio presenta características litológicas, estratigráficas, estructurales y geomorfológicas bien definidas: que controlan el comportamiento -- del agua subterránea y superficial. Dichas características son el reflejo de una evolución geológica regional desde el Paleozoico tardío al Reciente de la parte centro-meridional de México.

IV.I Geología Regional

Fries (1960) menciona que las rocas metamórficas Es--- quisto Taxco sobreyacidas discordantemente por las Rocas Verdes de Taxco Viejo, de edad paleozoica y triásica respectivamente, conformaron una paleopenínsula que se hundió y emergió a través de la historia geológica. Sobre dicho basamento se depositaron en tiempos mesozoicos los sedimentos marinos de la Plataforma - Guerrero-Morelos, producto de la gran transgresión marina del Ju rásico superior. Dicha secuencia marina abarca un rango cronoe-stratigráfico hasta el Cretácico superior, y se extiende en su mayor parte en el Estado de Morelos y en pequeñas porciones alnoreste del Estado de Guerrero y suroeste del Estado de México. De la misma manera al occidente del continente y en tiempos Ju rásico-Cretácico se desarrolló un volcanismo de tipo arco volcá nico-marginal, conocido como arco Alisitos-Teloloapan (Campa, - 1978), conformado por una secuencia volcánico-sedimentaria y co mo resultado de la subducción del paleo-pacífico.

Las unidades sedimentarias marinas de la región se en-

cuentran cubiertas discordantemente por rocas volcánicas del Eje Neovolcánico, que según Demant (1978 y 1982) es el resultado de la deformación y fracturamiento de la parte meridional de la Placa Norteamericana, causado por el desarrollo de la fosa de Acapulco durante el Oligoceno-Mioceno, y como consecuencia del movimiento diferencial entre Norteamérica y la Placa Caribeña a lo largo de las fallas Polochic-Motagua (véase figura No. IV.1).

Demant (op. cit.) menciona también que el volcanismo únicamente Plio-Cuaternario de la parte centro-oriental del Eje Neovolcánico, no está relacionado genéticamente al fracturamiento y a la deformación ya mencionada, sino al magmatismo emplazado sobre de estas debilidades corticales como producto de la subducción de la Placa de Cocos. Posteriormente a esta actividad volcánica se desarrollaron depósitos clásticos continentales del Cuaternario y Reciente.

IV.2 Geología Local.

En el siguiente subcapítulo se presenta un resumen de la geología de la región estudiada, basado principalmente de los trabajos de Fries (1960).

IV.2.1 Estratigrafía

Cretácico

Formación Xochicalco (Kx)

La Formación Xochicalco (Fries 1960), aflora únicamente en el límite centro-occidental del área, su base no está expuesta y su cima está cubierta por la Formación Morelos en forma discordante, su espesor promedio es de 500 m. Consta de -- una sucesión de capas delgadas a medianas de calizas de color gris con material carbonoso mezclado e interestratificadas con lutitas. En su parte superior está laminada y con abundancia de pedernal, hacia la base las capas son más gruesas y hay menor cantidad de pedernal. La textura de las calizas es variable desde la calcilutita hasta calcarenita con predominancia -- de tamaños menores, el grado de dolomitización es bajo. La -- edad de esta formación es aptiana.

Formación Morelos (Km)

La Formación Morelos (Fries, 1960), se encuentra desde el límite occidental hasta el oriental y desde el meridional hasta el septentrional del área en estudio. La mayoría -- de sus afloramientos corresponden a estructuras anticlinales y se caracteriza por presentar gran desarrollo cárstico. La base aflora en el extremo centro-occidental (véase plano hidro-- geológico anexo) donde aparece la Formación Xochicalco infrayacente y en donde su espesor no pasa de los 400 m., aunque en -- el centro del área puede alcanzar hasta los 900 m.

El miembro basal aflora en la esquina suroccidental - de la zona, constituido por anhidrita laminada, es probable -- que este miembro se presente también por debajo de la parte -- central de la región, ya que en el contacto con la Formación Xo chicalco no existe. La parte inferior de esta unidad expuesta en el anticlinal de Ticumán, entre Ticumán y más al norte de - Yautepec, muestra un carácter no estratificado y brechoide por lo que se cree que contenga algo de anhidrita o que esta exista con mezcla de yeso debajo de la superficie.

Las capas carbonatadas presentan interestratificación de caliza y dolomías, la textura de la caliza varía desde calcilutita a calcirrudita, con predominancia de calcarenitas. El rango cronoestratigráfico es del Albiano medio - Cenomaniano - temprano.

Formación Cuautla (Kc)

La Formación Cuautla (Fries, 1960), se encuentra distribuida en las mismas partes donde aparece la Formación Morelos, descansando discordantemente sobre de esta, en algunos lugares presenta en la base capas clásticas derivadas de la erosión subaérea de la Formación Morelos. Su espesor máximo es - de 700 m. encontrados en la parte central de la zona, hacia el oriente y occidente se adelgaza hasta menos de 100 m. Esta -- formación está constituida de tres facies:

a) Una secuencia de capas medianas a gruesas de caliza fosilífera de tipo banco calcáreo.

b) Capas delgadas de calizas carentes de fósiles.

c) Secuencia de capas delgadas de caliza clástica con mezcla de arcilla e intercalaciones lutíticas.

La primera facies es la que más abunda y está constituida por calizas en estratos de 4m. a 20 cm. de espesor, la textura predominante es la calcarenita presentando intercalaciones de calcilutita, calcilimolita y calcirrudita. Los nódulos y lentes de pedernal abundan y sobre todo en los planos de estratificación. En general la caliza es bastante pura y no es notable la presencia de capas dolomíticas ni de materiales arcillosos.

La edad de la Formación Cuautla abarca desde el Cenomaniano tardío hasta el Turoniano tardío.

Formación Mexcala (kmx)

La Formación Mexcala (Fries 1960), aflora en la mitad occidental, donde ocupa sinclinales entre los anticlinales de caliza, descansa discordantemente sobre la Formación Morelos.- está formada por lutitas calcáreas y limolitas con interestratos de arenisca y de conglomerado de grano fino. En la parte inferior de la unidad las capas suelen mostrar estratificación cruzada, mientras que en la parte superior existe una estratificación graduada consistente en una sucesión repetida de arenisca, limolita y lutita. El espesor máximo es de 1200 m. y su edad comprende desde el Turoniano superior al Cenomaniano.

Terciario

Grupo Balsas (E Ø b)

El Grupo Balsas (Fries, 1960), consiste de depósitos - clásticos, volcánicos y lacustres, que descansan en forma angular y erosional sobre formaciones cretácicas.

El tipo litológico más importante y que constituye la base de este grupo, son conglomerados calizos de moderadamente a bien endurecidos, de estratificación masiva a gruesa, los - - fragmentos son de tamaño grava y hasta de 50 cm. de diámetro, - compuestos por caliza, dolomía, pedernal y menores cantidades - de arenisca o limolita calcárea. La matriz es de arena, limo - y arcilla con óxidos de hierro y calcita como cementante. Las capas varían en espesor desde 20 cm. hasta más de 1m., mientras que el espesor máximo de estos conglomerados es de 500m. Sobre yaciendo a los conglomerados calizos existen capas de 5 cm. a - 1m. de espesor, ligeramente endurecidas, de limos, arena, arcilla y materia tobácea, en la parte suroccidental de la región - esta secuencia presenta en su parte inferior intercalaciones de derrames basálticos. El espesor de esta secuencia oscila entre los 800 y 2000 m.

Existen cuerpos lenticulares compuestos por una serie de capas delgadas de yeso que se interdigitan con, o están contenidos en la secuencia clástica anterior. La zona más reconocida de estos cuerpos está limitada al oriente por afloramientos entre Cocoyoc y Oaxtepec, al norte y poniente por Oacalco y al sur por el afloramiento que se encuentra al suroeste de Yau-tepec, el espesor aproximado de esta lente es de 30 m, y sin du da se debe continuar debajo de las unidades más jóvenes hacia -

el norte, oriente y poniente. También existen otros dos cuerpos de menores dimensiones, uno en las orillas de E. Zapata y el otro al poniente de Alpuyecá.

El Grupo Balsas además contiene lentes de más o menos 60 m. de espesor, de calizas lacustres en capas de 20 a 70 cm., que con las lentes de veso se presentan indudablemente en diferentes horizontes de este grupo.

En cuanto al espesor del grupo, este excede los 2500-m. y su edad corresponde al Eoceno superior - Oligoceno medio.

Riolita Tilzapotla (Øti 1)

La Riolita Tilzapotla (Fries 1960), aflora principalmente en el ángulo suroccidental del área, descansando discordantemente sobre el Grupo Balsas y formaciones cretácicas. Su espesor máximo se aproxima a los 250 m. y se acuña hacia el --norte. Consta en gran parte de ignimbritas con fragmentos hasta de 30 cm, pero localmente se presentan derrames y brechas - de composición riolítica. La edad de esta unidad es del Oligoceno superior.

Formación Tlaica (Øti2)

La Formación Tlaica (Z. de Cserna, 1964), son rocas - silíceas que forman la base de la secuencia volcánica del Terciario, sobreyace discordantemente al Grupo Balsas. Su espesor aproximado es de 200 m., presenta una litología variada -- desde composición riolítica hasta latítica. En ciertas partes consta de ignimbritas de aspecto parecido a las de la Riolita-Tilzapotla. La edad de esta formación es del Oligoceno tardío.

Rocas Volcánicas del Terciario Medio (RMv)

Esta secuencia (Schalaeffer, 1968), aflora en el ángulo nororiental del área, la cual comprende la base de la Sierra Nevada. La parte inferior de esta unidad, está constituida por dácitas sobreyacidas por tobas de composición intermedia. El espesor de esta secuencia es cercano a los 2000 m. y su edad es del Oligoceno tardío-Mioceno.

Formación Tepoztlán (Mtn)

La Formación Tepoztlán (Fries, 1960), aflora en la parte centro-septentrional y en la parte nor-occidental del área, cubre en discordancia erosional al Grupo Balsas y con discordancia angular a rocas cretácicas. El espesor parece llegar a - - 1000 m. en la parte centro-septentrional, adelgazándose hacia el poniente y sur. Está constituida por una secuencia de capas volcanoclásticas masivas con buzamientos de unos cuantos grados hacia el norte, representados por corrientes de lodo volcánico- "Lahares", los cuales están constituidos por fragmentos tobáceos y detritos con diámetros de 1 m. hasta una matriz de grano fino, todo de origen volcánico y en gran parte de composición andesítica, además estas corrientes están interestratificadas con tobas de la misma composición.

También existen en menor proporción depósitos fluviales, formando lentes de arena y grava con estratificación cruzada. La edad de esta formación es del Mioceno temprano.

Grupo Buenavista (Mb)

El Grupo Buenavista (Fries, 1960), aflora en la esquina suroccidental del área, donde descansa en discordancia erosional sobre la Riolita Tilzapotla. Está constituido por derrames de lava de composición andesítica predominantemente, pero también se presentan basaltos, dacitas y aún riolitas, con interestratos de tobas, brechas volcánicas y areniscas tobáceas. El espesor promedio es de 1000 m. acunándose hacia el norte y oriente. Su edad equivale del Mioceno medio al Mioceno tardío.

Grupo Ixtlilco (Mi)

El Grupo Ixtlilco (Z. de Cserna, 1964), consta de una secuencia de rocas volcánicas que afloran en la parte centro-meridional del área, descansando con discordancia erosional sobre la Formación Tlaica, presenta un espesor de 500 m. Está constituido por derrames de riodacita y traquiandesita, con interestratificaciones de capas piroclásticas. Su edad abarca del Mioceno medio al Mioceno tardío.

Grupo Tepexco (Mt)

Representa una secuencia de rocas volcánicas que afloran en el sureste de la región estudiada (Z. de Cserna, 1964), la cual forma un conjunto de derrames de lava de composición riodacítica, andesítica y dacítica, con capas piroclásticas interestratificadas. Su edad es equivalente del Mioceno medio

al Mioceno tardío.

Formación Iztaccíhuatl (Mpi)

La Formación Iztaccíhuatl (Schlaepfer, 1968), aflora en el ángulo nororiental, comprende una serie de derrames lávicos sobrepuestos, de lavas mesocristalinas y porfídicas de composición dacítica o riódacítica, que forman la masa principal de los volcanes del Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Los derrames superiores consisten de una andesita hornbléndica de color rosa do, los cuales se encuentran cubiertos por lavas recientes del volcán del Popocatepetl. La edad de esta formación es del Mioceno tardío al Plioceno.

Formación Cuayuca (Mc)

Se propone el nombre de Formación Cuayuca (Fries, - - 1964), a una secuencia de capas lacustres poco comentadas que afloran en el ángulo suroriental, constituida por las siguientes facies: la facies inferior inferior (Mcc) consta de capas clásicas de gravas hasta limos finos, encima o interdigitada con ella existe una secuencia de capas calizas, pedernal y marga, con diferentes proporciones de óxidos de fierro y mezcla de -- acrilla y limo. La tercera facies (Mcy) consta de yeso sobreyaciendo a las otras dos facies. El espesor de las dos primeras facies es de 300 m. y las facies de yeso alcanzan los 200 m. - Esta formación se acuña hacia el norte y poniente, y su edad es del Mioceno tardío al Plioceno temprano.

Andesita Zempoala (Pz)

En la esquina noroccidental de área en estudio aparece el afloramiento más suroccidental del complejo volcánico de Zempoala, formado por la andesita Zempoala (Fries, 1960), la -- cual cubre discordantemente a la Formación Tepoztlán, y es sobreyacida discordantemente por el Grupo Chichinautzin y por la Formación Cuernavaca. Esta unidad constituye corrientes andesíticas con intercalaciones de capas piroclásticas de la misma composición. El espesor aproximado de la unidad es de 800 m. y su edad es del Plioceno temprano.

Riodacita Popocatépetl (PQp) y Formación Tlayécac (Pt)

Estas secuencias forman el complejo volcánico del Popocatépetl (Z. de Cserna 1964).

La Riodacita Popocatépetl conforma la masa principal del volcán, predominando las riodacitas entre las lavas, con intercalaciones de dacita, latita cuarcíferas y traquitas. -- Las lavas tienen colores oscuros con texturas porfídicas en matriz pilotaxítica, traquítica o hialopilitica, predominando los fenocristales y microlitos de andesina, y en segundo término los de hiperstena. También estas lavas presentan intercalaciones de lahares y se presenta localmente interdigitada con el Grupo Chichinautzin, aluvión y con la Formación Tlayécac. -- Su espesor sobrepasa los 2500 m. y su edad es del Plioceno al Reciente.

La Formación Tlayécac aflora en la parte centro-oriental de la región, en los flancos inferiores del volcán Popoca-

tépetl. Constituye depósitos laháricos de composición intermedia, con derrames lávicos intercalados, de basaltos y andesitas. Localmente existen lentes y capitas de arena y grava de origen fluvial. El espesor de esta formación es de más de 100 m. y su edad es del plioceno.

Formación Cuernavaca (Pc)

La Formación Cuernavaca (Fries, 1960), aflora en la mitad occidental y noroccidental de la zona estudiada. La parte septentrional y topográficamente más alta de la formación está formada por conglomerados en abanico, de composición preferentemente andesítica. Localmente existen depósitos tobáceos y algunas capas tienen un carácter lahárico.

Más al sur las capas se hacen progresivamente más delgadas que rara vez exceden los 2 m. de espesor, con conglomerados arenosos y limosos. Existen depósitos de marga al oriente de Chinameca, travertino al norte de Tlaltizapán y al sureste de Temilpa y yeso al sureste de Tlaltizapán. Esta formación descansa en forma de discordancia angular sobre la Andesita -- Zempoala y está cubierta de la misma manera por el Grupo Chichinautzin. Su espesor es de unos 300 m. y su edad es Plioceno tardío.

Cuaternario

Grupo Chichinautzin (PQc)

Este grupo comprende todas las corrientes lávicas y ~

materiales piroclásticos de composición basáltica, andesítica e inclusive dacítica, que descansan discordantemente sobre la Formación Cuernavaca y de unidades más antiguas (Fries, 1960). El área aflorante del Grupo Chichinautzin abarca la mayor parte de la zona septentrional, los basaltos son los que más predominan, de texturas porfídicas, con fenocristales de olivino y microlitos de labradorita y augita. También existen basaltos de iddingsita, augita, hiperstena y enstatita, así como andesitas de hornblenda e hiperstena. El material piroclástico está constituido por escorias basálticas y andesíticas. El espesor máximo de la secuencia es de 1800 m. y su edad es equivalente al Pleistoceno.

Depósitos Piroclásticos (Qp)

Estos materiales piroclásticos (Ortega, 1981), están ampliamente distribuidos en el valle de Amecameca, presentan una granulometría desde ceniza hasta lapilli, siendo más abundantes las cenizas. Sus espesores varían desde unos cuantos decímetros hasta varios metros y su edad es Plio-Cuaternaria.

Depósitos Clásticos Continentales (PQdc y Qal).

Los depósitos continentales de edad post-Cuernavaca no formados por corrientes lávicas o por conos cineríticos, se agrupan en una sola unidad constituida por gravas, arenas, limo y arcilla, así como cantidades menores de marga, tierra diatomea, turba, ceniza volcánica, loess y travertino. La única diferencia entre estas dos unidades es que los depósitos - -

(PQdc) contienen mayor cantidad de fragmentos volcánicos. El espesor de estos depósitos alcanza hasta los 30 m.

Rocas Intrusivas

Intrusivos Premiocénicos

El cerro de Colotepec ubicado en el centro-occidental del área es un tronco granítico (Tgc), que intrusión a la Formación Xochicalco y que forma el núcleo del anticlinal de Colotepec (Fries, 1960). Este intrusivo consta de una monzonita -- cuarcífera porfídica, con cuarzo, ortoclasa, andesina-oligoclasa, biotita y zircón. El emplazamiento de este granito ocurrió a fines del Cretácico y principios del Terciario.

Varios diques y sills no cartografiados, de composición máfica cortan a las formaciones Morelos y Cuautla en la -- mitad occidental del área. Más al sur varios sills de diabasa -- con fenocristales de olivino cortan a las mismas formaciones. -- Los diques silíceos se encuentran en menor proporción que los -- máficos.

Intrusivo Miocénicos

Estos cuerpos se encuentran en la parte suroriental -- de la región estudiada. Los troncos ígneos de Tlaica se encuen -- tran al oriente del poblado de Xalostoc y consisten de una dio -- rita (Mdx) que intrusión la Grupo Balsas.

Los troncos ígneos de Chalcatzingo, se encuentran al oriente del poblado de Jonacatepec y consisten de una granodiorita (Mgj) que intrusióna al Grupo Tepexco.

Ambas rocas intrusivas se consideran miocénicas.

IV.2.2 Geología Estructural

Los principales rasgos estructurales de la región son los siguientes: pliegues producidos en rocas cretácicas y en otras unidades más antiguas, fallas producidas después del período de deformación principal (Cretácico superior-Terciario inferior), así como el desarrollo de estructuras volcánicas entiempos Terciario -Cuaternario. Las siguientes descripciones estructurales fueron referidas de (Fries, 1960 y Demant, 1978 y 1982)

IV.2.2.1 Pliegues

Los rasgos estructurales regionales más notables son los pliegues mostrados por las rocas cretácicas (véase plano anexo).

Los pliegues ubicados al suroeste de la gran falla Jojutla están orientados al noroeste, mientras que los de la parte central del área se orientan más hacia el norte e inclusive viran al nor-noreste, como es el caso de los anticlinales de Ticumán y Chinconcuac-Jiutepec. La mayoría de los pliegues son relativamente cortos y buzan por sus dos extremos, excepto el anticlinal de Ticumán que es la estructura más continua, la cual mide hasta 40 km. de longitud pero sin duda se extiende más hacia el norte debajo de la cubierta terciaria. Por otro lado muchos pequeños pliegues no tienen más de 2 ó 3 km de longitud, generalmente los ejes de los pliegues se muestran curvados a lo largo de su rumbo.

IV.2.2.2 Fallas

Fallas post-cretácicas y pre-Balsas o del Balsas tem-
prano.

La falla antigua de Jojutla es de carácter normal y -
atraviesa la parte sur-central de la región con un rumbo al --
noreste, tiene una longitud de 35 km., la línea de falla está
cubierta por formaciones terciarias. La evidencia que comprue-
ba su existencia es la discontinuidad estructural mostrada por-
la terminación abrupta de los anticlinales y sinclinales de la-
región. El desplazamiento vertical alcanzado por esta falla es
de 600 a 800 m.

La falla del Cañón de los Lobos es de tipo normal, tie-
ne un rumbo hacia el noroeste y una distancia de 12 km. que - --
atraviesan el anticlinal de Ticumán, rocas cretácicas y el resto
es sepultado por rocas terciarias. Su extremo noroccidental se
divide en varias fallas divergentes. El desplazamiento verti-
cal máximo sobre de esta falla alcanza los 1500 m. y probablente
existe desplazamiento horizontal dextral, tal como se mues-
tra en el anticlinal de Ticumán y en otras estructuras.

En el flanco occidental del anticlinal de Ticumán se -
encuentran varias fallas normales con orientación preferencial-
al noroeste, que tienen varias decenas de metros de despla- -
zamiento, estas fallas son considerados contemporáneas a la falla
del Cañón de los Lobos.

Fallas post Balsas y pre-pleistocénicas

Existe una falla normal al sureste de Jojutla, que cor

ta a la Riolita Tilzapotla y al Grupo Balsas, poniendo a este último en contacto con la Formación Morelos, la longitud de esta falla es de 10 km. y su rumbo es al noroeste.

Otra falla se localiza al noreste de Ticumán, con orientación al noroeste y considerada del Terciario medio por estar afectando al Grupo Balsas.

Fallas post-pliocénicas

En este grupo se encuentran las fallas desarrolladas alrededor del Lago de Tequesquitengo, siendo más reciente que la Formación Cuernavaca.

IV.2.2.3 Estructuras Volcánicas

Existen en la parte septentrional del área un desarrollo marcado de conos volcánicos, que presentan una orientación preferencial noreste-suroeste casi este-oeste, dicho alineamiento es el reflejo de un fracturamiento a gran profundidad (Demant, 1968). Estos conos volcánicos están asociados a un gran número de colados de lava que en conjunto constituyen principalmente la masa volcánica de la Sierra Chichinautzin.

También existen coladas de lava y materiales piroclásticos intercalados que afloran en la zona nororiental, dicho material volcánico constituye la Sierra Nevada, la cual está edificada por los grandes estratovolcanes del Popocatepetl e Iztaccíhuatl y que presentan una orientación norte-sur.

IV.2.3 Geomorfología

De acuerdo con Fries (1960), gran parte de la región estudiada muestra una topografía construccional o de depósito, debida en primer término a la inundación y sepultura de valles y llanuras bajas por grandes abanicos aluviales de la Formación Cuernavaca, y en segundo término a las erupciones volcánicas y efusiones de lava del Grupo Chichinautzin. El proceso de aluviación pliocénico causó el enterramiento de gran parte de la topografía anterior y produjo grandes llanuras aluviales con inclinaciones de 3° a 5° hacia el sur en la zona septentrional y hasta un mínimo de 1° a 2° en las partes meridionales; borrándose las líneas de desagüe anteriores y estableciéndose una red nueva de drenaje.

Las corrientes basálticas inundaron el valle situado al oriente de Cuernavaca, también recorrieron el valle seguido por el río Yautepec y parcialmente cubrieron el valle de Cuautla.

En tiempos pleistocénicos tardíos y recientes, se originaron amplias llanuras casi a nivel, que fueron ampliadas por los aluviones de los valles afluentes.

La mayor parte de la zona septentrional de la región, está formada por lavas, brechas y tobas basálticas, en cuya superficie emergen conos cineríticos más jóvenes.

Las llanuras aluviales formadas por la Formación Cuernavaca están surcadas por barrancas profundas.

Las serranías formadas por caliza muestran generalmente un aspecto redondeado, pero las formadas por lutita, rocas volcánicas o rocas clásticas prepliocénicas tienen una apariencia más angular y están más complejamente disecadas; las rocas volcáni

cas terciarias tienden a mostrar flancos con pequeños acantilados. La zona volcánica de la Sierra Zempoala presenta un relieve abrupto y profundamente disecado, cubierto en parte por las lavas del Grupo Chichinautzin, que embalsaron los ríos provenientes de esta sierra, originando de esta manera las Lagunas de Zempoala. Otra zona volcánica con superficies bastantes erosionadas y con gran desarrollo de barrancas, es la que forma la porción sur de la Sierra Nevada. Los troncos ígneos de Tlaica presentan una forma del relieve poco distinta a la de las rocas encajonantes, mientras que los de Chalcatzingo -- tienen formas abruptas y aisladas que se destacan en la región.

Los valles principales de toda la región están orientados por lo general entre norte y noroeste, reflejando las estructuras predominantes de las rocas cretácicas. La mayoría de ellos -- ocupan sinclinales, pero dos ejemplos conspicuos de valles ocupando anticlinales son el situado entre Yautepec y Tlaltizapán, y el situado al sur de Tlalquiltenango.

Existen formas cársticas con mayor abundancia en terreno calizo, pero existen también en áreas de lutita y de rocas clásticas terciarias poco cementadas, donde las rocas carbonatadas quedan a poca profundidad. Las formas más grandes son poljes -- como por ejemplo: el Lago de Tequesquitengo y el Rodeo. Los poljes no ocupados por lagos son las siguientes áreas fluviales: poniente de Alpuyeca, sur de Xochitepec, norte de Puente de Ixtla y el oriente de Tlaltizapán. La edad de los poljes y dolinas se formaron en tiempos posteriores al principio del pleistoceno.

Según los estudios geomorfológicos (Hubb L. 1982), la parte -- septentrional del área en estudio, está representada por los siguientes tipos de relieve:

1) RELIEVE ENDOGENO (VOLCANICO ACUMULATIVO)

Relieve originado por la extraordinaria actividad volcánica a fines del Pleistoceno - Holoceno, dividiéndose en los siguientes tipos de relieve:

a) RELIEVE VOLCANICO EXPLOSIVO

Formas del relieve originadas por la expulsión de piroclásticos en forma violenta a través de un conducto central, dando como resultado las siguientes formas: conos volcánicos - cineríticos de la Sierra Chichinautzin, estratovolcanes del -- Popocatépetl e Ixtaccíhuatl, superficies de piroclastos (depósitos de tefra) de 1 a 10 m. de espesor y teniendo una amplia - extensión en la Sierra Chichinautzin.

b) RELIEVE VOLCANICO EFUSIVO

Se refiere a emanaciones de lava que originan formas muy diversas del relieve como son: laderas, mesas y coladas - de lava, desarrolladas preferentemente en la Sierra Chichinautzin y extendiéndose hacia el sur en el Estado de Morelos. Es te tipo de relieve también se caracteriza por su juventud y -- por no presentar una red fluvial integrada.

c) RELIEVE EFUSIVO-EXPLOSIVO

Relieve originado por procesos explosivos y efusivos.

que forma coladas de lava con cubierta piroclástica. Dicho fenómeno se atribuye a la actividad de varios centros eruptivos, que se desarrolló ampliamente en la Sierra Chichinautzin.

2) RELIEVE ENDOGENO-MODELADO

Son aquellas formas del relieve originadas por procesos volcánicos, transformados sustancialmente por actividad -- exógena, desarrollados principalmente en las sierras de Zempoala, Tepoztlán y en las laderas inferiores de la Sierra Nevada. Relieve formado por laderas montañosas producto de erosión fluvial y por procesos gravitacionales.

3) RELIEVE EXOGENO

Formas del relieve originadas por procesos glaciales, fluviales y lacustres. Estos procesos han sido interrumpidos por la gran actividad volcánica en especial de el Cuaternario. Las formas del relieve son: cañadas, abanicos y llanuras aluviales.

IV.2.4 Geología Histórica

El primer evento registrado en la región, fue la sedimentación marina de la Formación Xochicalco en el Aptiano, posteriormente a éste depósito ocurrió un levantamiento regional que formó la Paleopenínsula de Taxco. Un hiatus largo de duración desconocida separa esta última formación y la Formación -

Morelos que se depositó en aguas relativamente someras producto de la transgresión marina del Albiano-Cenomaniano. Hacia mediados del Cenomaniano la región emergió, emplazándose simultáneamente el tronco granítico de Colotepec, acompañado por la erosión diferencial de la cima de la Formación Morelos.

Durante el Turoniano se repitió una invasión marina - que ocasionó el depósito de la Formación Cuautla, mar adentro de la paleocosta se desarrolló un banco calcáreo, cuya margen occidental corre desde Cuernavaca hacia el sur pasando por el Lago de Tequesquitengo. Al poniente del banco calcáreo se depositaron calizas de esta misma unidad en ambientes de litoral o costeros.

Hacia el final del Turoniano ocurrió un cambio de sedimentación, que interrumpió la acumulación de los depósitos calcáreos, iniciando el depósito de la secuencia flysch de la Formación Mexcala, como consecuencia del levantamiento de las zonas volcano-sedimentarias ubicadas al sur y occidente de la región.

En tiempos avanzados del Cretácico la región quedó expuesta a la erosión subaérea y no volvió a sumergirse. La deformación intensa que formó el sistema de pliegues anticlinales y sinclinales ocurrió durante el Eoceno temprano y medio, como contrapartida a la orogénia Laramídica. La erosión se intensificó y el desagüe fue de régimen exorréico hasta algunas partes tardías del Eoceno, posteriormente los levantamientos y el afallamiento normal en bloques, produjeron un régimen endorréico con la consiguiente acumulación de enormes cantidades de sedimentos clásticos del Grupo Balsas sobre de fosas tectónicas; simultáneamente tuvo lugar la extravación probablemente fisural de las lavas máficas, y la acumulación de brechas volcánicas y materiales picoclásticos de esta misma unidad.

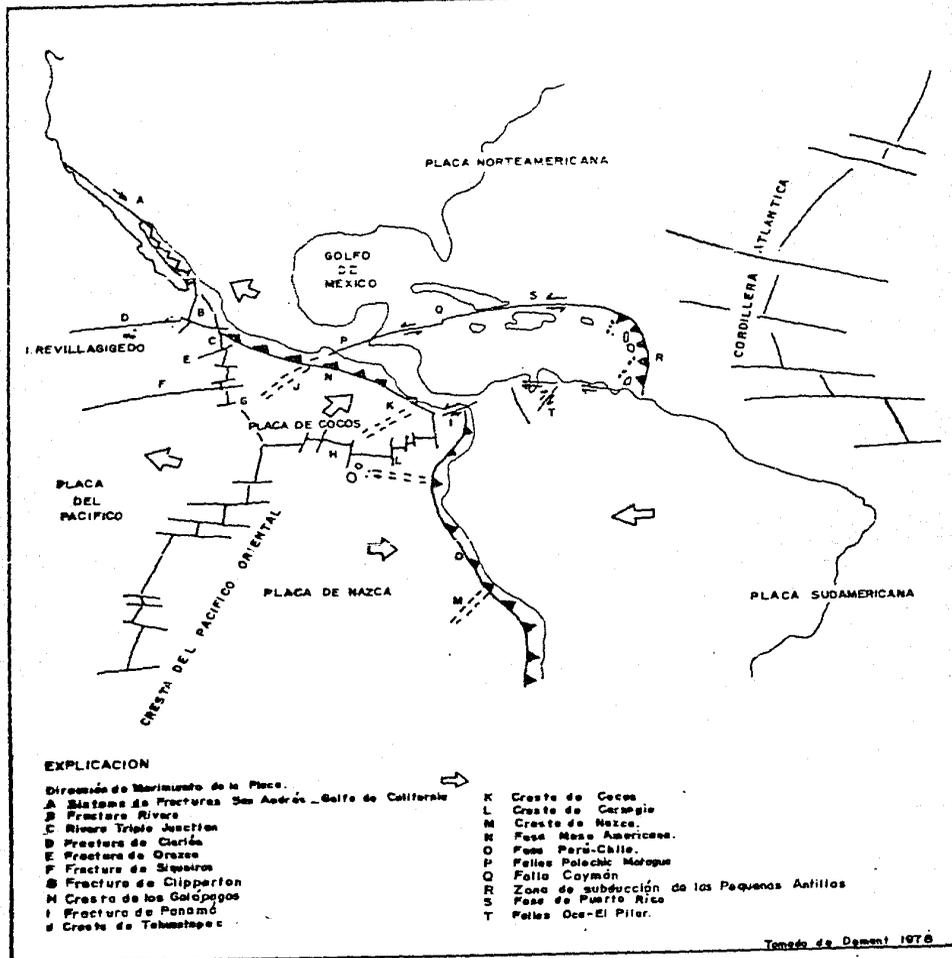
El afallamiento disminuyó gradualmente a principios - del Oligoceno, permitiendo el restablecimiento del régimen exorético y el cese del depósito del Grupo Balsas. A medida que iba disminuyendo esta acumulación comenzó un volcanismo hacia el final del Oligoceno, representado por la Riolita Tilzapotla y Formación Tlaica. Durante el Oligoceno superior y Mioceno - se formó un volcanismo constituido por las rocas volcánicas -- del Terciario medio, que constituyen la base de las series volcánicas de la Sierra Nevada y que según Mooser (1975) representa la tercera fase volcánica de la Cuenca de México.

En tiempos del Mioceno inferior se depositaron los -- materiales volcanoclásticos y fluviales de la Formación Tepoztlán. Por otra parte en tiempos exclusivamente miocénicos se depositaron las rocas volcánicas de los grupos Buenavista, - - Ixtlilco y Tepexco.

El volcanismo andesítico predominante continuo posiblemente hasta la primera parte del Plioceno en la región septentrional, formando la unidad Andesita Zempoala. Mientras -- que en la región suroriental se desarrollaban facies lacustres en tiempos Mioceno tardío-Plioceno temprano de la Formación -- Cuayuca. El volcanismo Mioceno tardío - Plioceno que prevaleció en la zona nororiental forma para Mooser (1975) la quinta fase del volcanismo de la Cuenca de México y que marca la formación de la Sierra Nevada. Posteriormente a este volcanismo se renovó el afallamiento que favoreció el bloqueo del desagüe y la consiguiente acumulación de la Formación Cuernavaca; cuya fuente de origen lo constituye los complejos volcánicos del Nevado de Toluca y de la Sierra Zempoala. El volcanismo Pleistocénico del Grupo Chichinautzin constituye para Mooser (1975) - la séptima fase del volcanismo de la Cuenca de México; el cual provocó la obstrucción moderna del drenaje de la Cuenca de México hacia el sur.

Sin embargo todas las series volcánicas de la región -- excepto la Riolita Tilzapotla y la Formación Tlaica, forman -- parte del Eje Neovolcánico de edad exclusivamente Plio-Cuaternaria (Demant, 1978, 1982) y que la orientación de el gran número de conos volcánicos cineríticos de la Sierra Chichinautzin y otros centros volcánicos, reflejan fracturas tensionales que coinciden con la dirección de los esfuerzos principales desarrollados en la fosa de Acapulco durante el Oligo-Mioceno. En cambio los grandes estratovolcanes de la Sierra Nevada se alinean perpendicularmente a la dirección de estos esfuerzos, formándose de esta manera zonas en compresión que facilitaron el establecimiento y evolución de cámaras magmáticas. Dichos esfuerzos tectónicos no intervienen en la génesis de los magmas si no el principal responsable de este mecanismo, está relacionado con la subducción de la placa de Cocos (véase figura No. IV.1)

Por último al final del Pleistoceno se desarrollaron dolinas y poljes producto de la disolución y colapso de rocas carbonatadas; finalmente se desarrolló una acumulación fluvial y piroclástica del Pleistoceno y Reciente.



EXPLICACION

Dirección de Movimiento de la Placa. →

- A Sistema de Fracturas San Andrés - Golfo de California
- B Fractura Rivera
- C Rincón Triple Junction
- D Fractura de Carrión
- E Fractura de Orizaba
- F Fractura de Siqueros
- G Fractura de Clipperton
- H Cresta de las Galápagos
- I Fractura de Panamá
- J Cresta de Tehuantepec

- K Cresta de Cocos
- L Cresta de Cerro Gordo
- M Cresta de Nazca
- N Faja Mesa Americana
- O Faja Para-Chile
- P Fajas Polochic Motague
- Q Faja Caymán
- R Zona de subducción de las Pequeñas Antillas
- S Faja de Puerto Rico
- T Fajas Occ-El Pilar

Tomado de Dament 1978

Figura. IV.1 Tectónica del Caribe y del Pacífico Centro

V HIDROLOGIA SUPERFICIAL

V.1 Climatología

En la zona de interés se cuenta con 24 estaciones climatológicas de S.A.R.H., cuya relación se presentan en la tabla No. V.1 y su ubicación puede observarse en la figura No. - V.1. En cada estación climatológica se cuenta con datos medios anuales de precipitación, evaporación y temperatura para el período 1971-1980, tomados de S.A.R.H. (1980 a y b, 1981). Con base en estos datos se realizó una análisis de su magnitud y distribución, tal como se presenta a continuación.

V.1.1 Precipitación

Este elemento climático se define como el agua de lluvia (precipitación líquida), nieve, escarcha o granizo (precipitación sólida), que llega a la superficie terrestre. En la práctica es importante conocer como se distribuye espacialmente la precipitación, de tal forma que se elaboró un plano de isoyetas (véase figura No. V.1) en donde se observa que la altura de precipitación varía entre 800 y 1800 mm. Los valores más altos de la precipitación se distribuyen en las sierras de Chichinautzin, Nevada y Zempoala, mientras que en las zonas topográficamente más bajas la lámina de precipitación es menor, como es en las llanuras de Cuautla-Yautepec, Cuernavaca, Jojutla-Zacatepec y Tepalcingo. Esta distribución es reflejo del control orográfico de la precipitación.

V.1.2 Temperatura

La temperatura media anual en la región varía entre -9.7 y 24.3 °C, estas variaciones se deben a las condiciones topográficas, como en las partes altas de las Sierras de Chihuahuacán, Zempoala y Nevada se observan los rangos menores de temperatura (véase figura No. V.2). En las zonas de Cuautla, Zacatepec, Jojutla y Tepalcingo, se presentan los rangos mayores de temperatura, mientras que a la altitud de Cuernavaca y Tepoztlán se muestran los valores intermedios de la temperatura.

V.1.3 Evaporación y Evapotranspiración

Otro de los puntos de mayor importancia en un estudio hidrológico es la evaporación, ya que la mayor parte de la precipitación se reincorpora a la atmósfera por este medio. La evaporación se define como el proceso a través del cual el agua que se encuentra en la superficie terrestre en forma líquida pasa al estado gaseoso. También se considera dentro de este término a el agua en estado sólido que se transforma al estado gaseoso mediante el proceso de sublimación. El fenómeno consiste en que el agua en la superficie del terreno adquiere por vía solar una energía cinética que provoca su cambio de estado. Los rangos de evaporación de la región oscilan entre 1276 y 2363 mm.

Con los datos disponibles se configuró en su mayor parte la distribución espacial de la evaporación, como se muestra en la figura No. V.3, en donde se observa que los valores menores de evaporación tienden a presentarse en las Sierras de

Chichinautzin, Zempoala y Nevada, por otro lado existen zonas aisladas donde se manifiestan los valores más altos de evaporación como es en las zonas de Temixco, Moyotepec y Tepalcingo.

La evapotranspiración es uno de los elementos del ciclo hidrológico más difícil de estimar, porque en este fenómeno intervienen el agua que se evapora al caer directamente sobre la superficie terrestre, por el uso que de ella hacen las plantas para sus procesos vegetativos y por el agua que se evapora directamente de las superficies libres. Por lo que para calcular la evapotranspiración real se aplicó el método de L. Turc, que utiliza los datos de precipitación y temperatura de cada estación climatológica. La fórmula empleada es la siguiente:

$$E_{tr} = \frac{P}{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}$$

Donde:

- E_{tr} = Evapotranspiración real en mm/año
 P = Precipitación media anual en mm/año
 L = $300 + 25T + 0.05 T^3$
 T = Temperatura media anual en °C

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla No. V.1 y su distribución en la figura No. V.4, donde se observa que los valores mayores se presentan en el sector sur-centro de la región y los valores menores tienden a presentarse en las Sierras de Chichinautzin, Zempoala y Nevada; mientras que en general la variación de la evapotranspiración en la región oscila entre 273.1 y 979.9 mm.

V.2 Esgurrimientos Superficiales

V.2.1 Cuencas y Subcuencas Hidrológicas

El área en estudio está comprendida en su mayor parte en la Región Hidrológica del Río Balsas número 18 de SARH (véase figura No. V.5), la cual pertenece a la vertiente del Océano Pacífico. Dentro de esta región se tiene parte de las Cuencas del Río Atoyac (A) y la del Río Grande de Amacuzac (F).

Las corrientes del Río Atoyac se originan de los deshielos que descienden desde altitudes del orden de 4000 m.s.n.m. del flanco oriente de la Sierra Nevada y que representa una de las corrientes principales que alimentan al Río Balsas. Existe en la zona suroccidental una porción de la subcuenca del -- Río Nexapa (e 4086), perteneciente a la Cuenca del Río Atoyac.

El Río Grande de Amacuzac es también uno de los -- afluentes más importantes del Río Balsas. Este río se origina en las faldas del Nevado de Toluca a una altitud de 2600 m.s.n.m., dicha corriente al llegar a las zonas cársticas de Cacahuamilpa continúa en forma subterránea, confluyendo de la misma forma con el Río Chontalcuatlán, donde posteriormente emergen en una sola corriente en las grutas de Cacahuamilpa, después -- escurre en dirección sureste confluyendo con el Río Cuautla, -- pero recibe antes a los Ríos Chalma y Yautepec, después prosigue hacia el sur para derivar por la margen derecha del Río -- Mexcala (nombre que se le conoce al Balsas en esta región).

Las subcuencas de la Cuenca del Río Grande de Amacuzac con mayor área en la región en estudio son: la del Río --- Yautepec (c 1049). Véase figura No. V.5, este río se origina-

en los Manantiales de Oaxtepec y confluye al sur de Sojotla con el Río Apatlaco, el cual forma parte de la subcuenca del mismo nombre (d 479). El Río Cuautla forma la subcuenca llamada del Río Cuautla (b 1092), esta corriente se origina en las faldas occidentales del Popocatepetl, que pasa por Cuautla y deriva hacia el Río Amacuzac por la margen izquierda.

Los datos Hidrométricos de los principales ríos del área en estudio se presentan en la tabla No. V.2 y las estaciones hidrométricas en la figura No. V.5, esta información se obtuvo del INEGI (1983 a)

Otras subcuencas de la Cuenca del Río Grande de Amacuzac con poca área comprendida en la zona de estudio, es la del Río Alto de Amacuzac (f 2267) y la del Río Bajo de Amacuzac (a 2197). También la parte septentrional del área abarca una pequeña porción de la zona sur de la subcuenca del Lago de Texcoco y Zumpango (p 4900), correspondiente a la Cuenca del Río Moctezuma (D) de la región hidrológica del Río Pánuco.

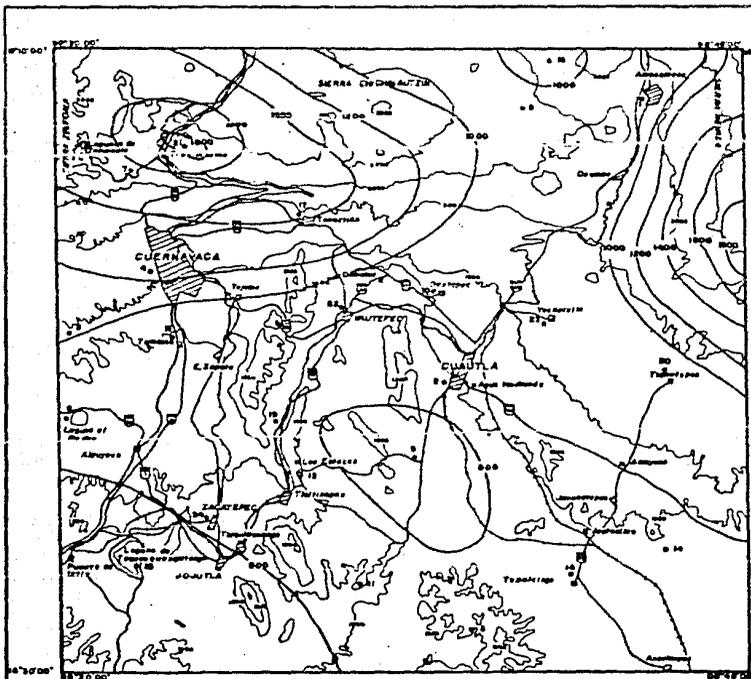
La Sierra de Chichinautzin constituye el parteaguas fisiográfico entre las Cuencas de los Ríos Moctezuma y Grande de Amacuzac. Por otra parte y como rasgo característico de la región es que los manantiales existentes generan la mayor parte de los escurrimientos superficiales.

TABLA No. V.1
 PRECIPITACION, TEMPERATURA, EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION
 PERIODO 1971-1980

ESTACION No.	NOMBRE DE LA ESTACION	PRECIPITACION MEDIA ANUAL EN m.m	TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN m.m	EVAPORACION - MEDIA ANUAL EN m.m	EVAPOTRANSPIRACION REAL EN m.m
1	Amecameca	974.8	13.6	1296.2	786.8
2	Cuautla	861.7	21.6	1994.3	657.2
3	Cuentepec	1066.9	21.7	No registra	701.2
4	Cuernavaca	1202.1	20.8	1947.8	669.5
5	El Limón	820.9	21.6	2050.6	644.8
6	El Rodeo	870.7	23.5	2103.3	713.0
7	Huitzilac	1479.9	12.2	1335.8	275.1
8	Juchitepec	872	14.1	1302.9	478.2
9	Moyotepec	740.8	22.8	2347.9	640.5
10	Oaxtepec	996.1	21.9	1893.9	698.1
11	San Pablo Hidalgo	882.6	24.2	1800.6	979.9
12	Temilpa	873.6	23.1	1723.3	703.3
13	Temixco	850.1	23.1	2363.2	694.6
14	Tenango	832.8	23.4	2144.3	694.8
15	Tenango del Aire	1064.0	13.5	No registra	372.1
16	Tepalcingo	862.2	23.2	2245.8	734.5
17	Tepoztlán	1471.2	17.1	No registra	164.8
18	Tequesquitengo	777.0	24.3	2197.0	688.4
19	Ticumán	833.7	23.0	1897.0	685.6
20	Tlacotepec	964.5	19.5	1440.9	605.5
21	Tres Cumbres	1835.6	9.7	No registra	319.1
22	Yantepec	913.4	21.0	1573.7	651.0
23	Yecapixtla	985.6	20.0	2076.0	625.9
24	Zacatepec	857.0	23.4	1865.6	707.4

TABLA No. V. 2
DATOS HIDROMETRICOS

NUM.	ESTACION	CORRIENTE	AREA DE LA CUENCA Km ²	VOLUMEN MEDIO ANUAL MILL. m ³	GASTO MEDIO ANUAL m ³ /seg.	GASTOS EXTREMOS m ³ /seg.		PERIODO	DEPENDENCIA
						MAXIMO	MINIMO		
1	Cuatla	Río Cuatla	327.3	72.1	2.290	426.0	0.2	1953-1970	SARH
2	Yautepec	Río Yautepec	545.9	44.4	1.410	195.0	0.1	1950-1970	SARH
3	Ticumán	Río Ticumán	964.3	30.5	0.967	429.0	0	1952-1970	SARH
4	Temixco	Río Apatlaco	331.1	62.9	1.990	167.0	0.06	1957-1970	SARH
5	Zacatepec	Río Apatlaco	697.1	111.0	3.520	445.0	0.09	1956-1970	SARH

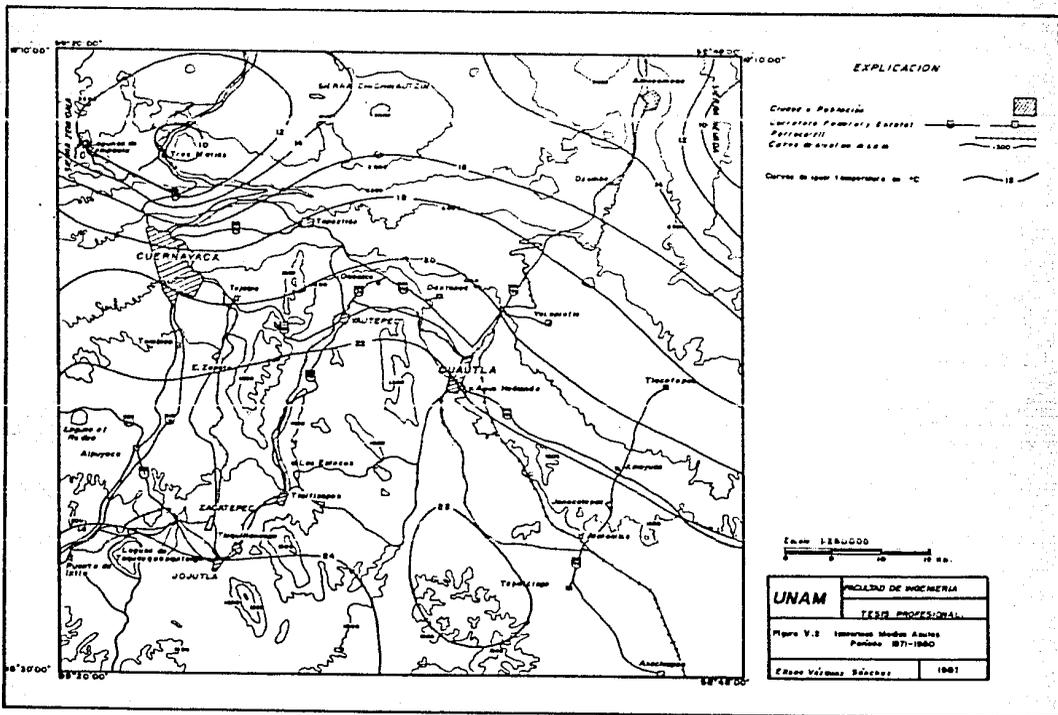


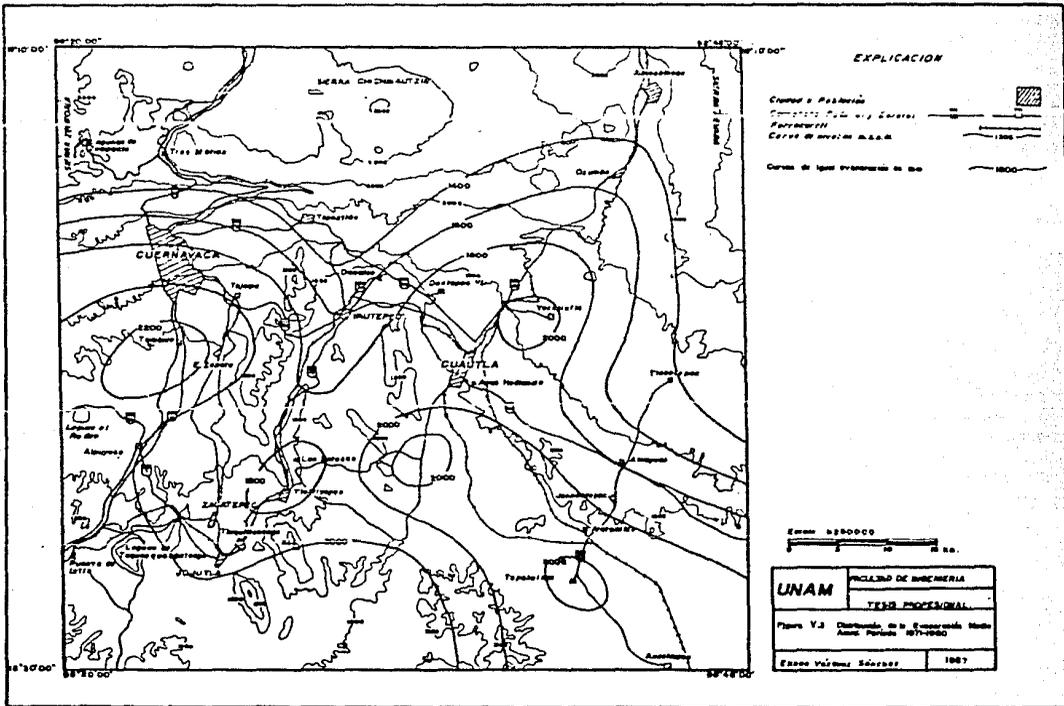
EXPLICACION

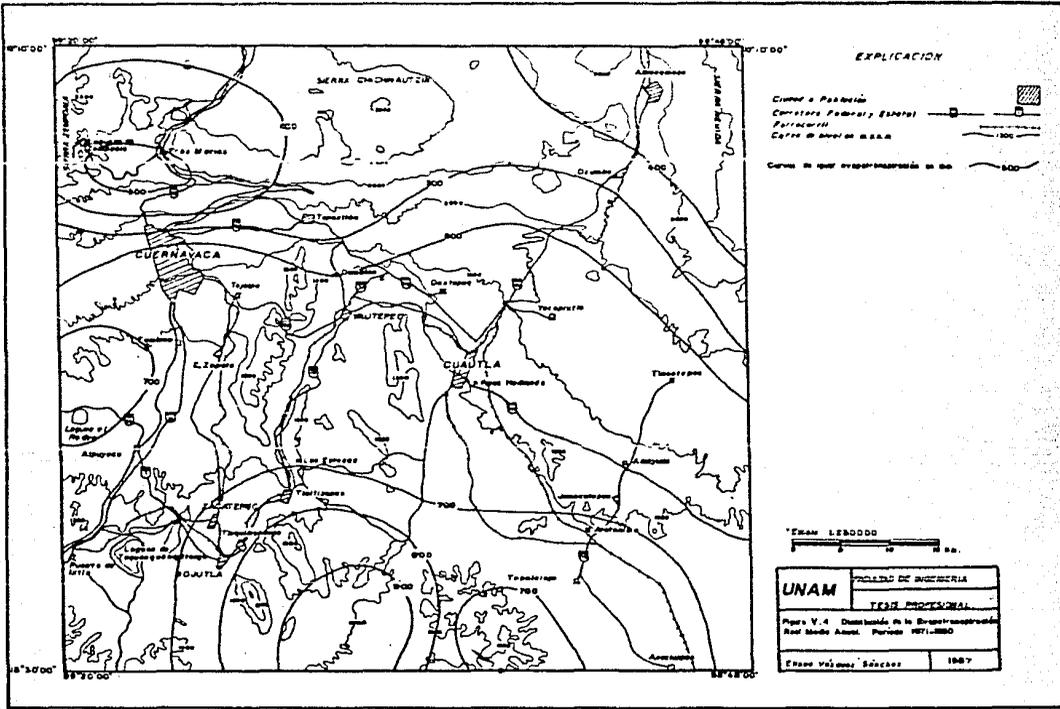
- Camino y Pastoreo 
 Caminos Federales y Estados 
 Ferrocarril 
 Camino de Hierro 
 Curvas de igual pendiente en sus Estados Cuernavaca  1000 50

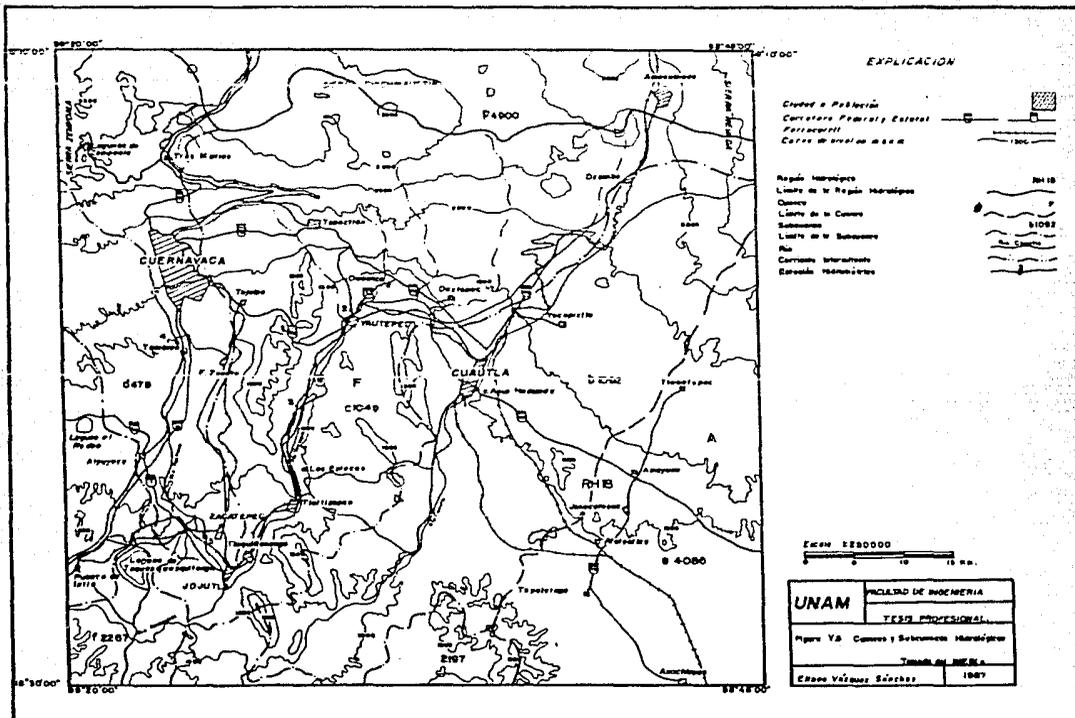
Escala 1:50000
 0 10 20 30 KM.

UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA
	TRABAJO PROCEDURAL
Figura U-1 Inventario de Obras de Infraestructura Período 1971-1980	
Escala Vertical: 1:50000	1981



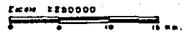






EXPLICACION

- Ciudad o Población
 - Carrilero Federal Estadal
 - Ferrocarril
 - Calle de ancho mixto
-
- Región Hidrográfica RH 18
 - Límite de la Región Hidrográfica
 - Cauce
 - Límite de la Cauce
 - Subcauce S 1082
 - Límite de la Subcauce
 - Rio
 - Carrilero Interurbano
 - Elevación Hidrográfica



UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
Figura Va Cauce y Subcauce Hidrográfico	
TITULAR DEL TRABAJO	
Eduardo Valdez Sánchez	1987

VI HIDROLOGIA SUBTERRANEA

VI.1 Unidades hidrogeológicas

Se define como una unidad hidrogeológica a una unidad litológica, formación geológica o conjunto de formaciones geológicas que tienen características similares de permeabilidad y de comportamiento hidrogeológico, es decir, que el comportamiento del agua subterránea es similar dentro de esta unidad -- no importando su clasificación litológica. La distribución superficial de estas unidades se muestra en el plano hidrogeológico anexo.

Antes de asignar el carácter hidrogeológico a las diferentes formaciones geológicas se consideraron los análisis cualitativos de porosidad y permeabilidad, en relación a las características litológicas y granulométricas, así como del -- análisis de los principales tipos de apertura existentes en -- cada unidad litológica. A continuación se describe el comportamiento hidrogeológico de cada unidad litológica.

VI.1.1 Comportamiento hidrogeológico

FORMACION XUCHICALCO (Kx)

Está constituida principalmente por calizas con alto contenido de arcillas, compactas y bien cementadas, con mezcla de material carbonoso y con alto contenido de pedernal. El --

fracturamiento de esta unidad es escaso y los miembros carbonatados no presentan rasgos de disolución. De acuerdo a estas -- características esta formación representa zonas de escasa permeabilidad.

FORMACION MORELOS (Km)

El miembro basal está constituido por anhidritas, cuya permeabilidad en este tipo de roca está sujeta a las condiciones del fracturamiento y de disolución. El miembro carbonatado está formado principalmente por calizas arenosas y dolomías de grano fino, ambas de carácter compacto, bien cementadas, -- fracturadas y con mayor grado de disolución que las calizas de la Formación Cuautla. Presenta también superficies de poco espesor de caliche. En general toda la formación presenta zonas de alta permeabilidad, pero puede existir un incremento mayor -- de esta permeabilidad, debido al grado y condiciones del fracturamiento y de disolución.

FORMACION CUAUTLA (Kc)

Las facies de banco calcáreo que más abundan, están -- formadas principalmente por calizas arenosas, compactas, bien -- cementadas, con desarrollo cárstico y fracturadas. Estas características manifiestan áreas de alta permeabilidad secundaria, pero aún pueden existir zonas de mejor permeabilidad causadas -- por condiciones favorables de fracturamiento y de disolución. -- En menor proporción, forma zonas de baja permeabilidad, por pre -- sentar capas de caliza clástica con abundante arcilla e interca -- ladas con lutitas.

FORMACION MEXCALA (Kmx)

Consta principalmente de una secuencia interestratificada de areniscas compactas y bien cementadas, lutitas calcáreas de aspecto deleznable y de limolitas bien cementadas y de carácter compacto. En conjunto toda la formación presenta escaso fracturamiento. Según las características mencionadas esta unidad representa áreas de baja permeabilidad, funcionando probablemente como unidad confinante de los acuíferos de las formaciones Cuautla y Morelos.

GRUPO BALSAS (E6b)

Existe una gran variedad de rocas en este grupo que le caracterizan un comportamiento hidrogeológico variable.

Los conglomerados calizos son compactos, poco fracturados, con fragmentos mal clasificados, bien redondeados, en matriz limo-arcillosa y bien cementados con calcita. Estas características le asignan a esta unidad un comportamiento de baja permeabilidad, al igual que la secuencia limo-arcillosa que sobreyace a estos conglomerados. La permeabilidad favorable de los derrames volcánicos y piroclásticos depende del fracturamiento y de la granulometría de los piroclásticos, y de las lentes de yeso y caliza lacustre, depende de la disolución de estas. En general todo el grupo representa áreas de baja permeabilidad, pero puede adquirir mejor permeabilidad, debido principalmente a la disolución de cementante calcáreo y de los fragmentos calizos de los conglomerados.

RIOLITA TILZAPOTLA (Øti1)

Las rocas más abundantes son ignimbritas compactas con fragmentos empaquetados en piroclastos más finos, aunque se encuentra regularmente fracturada (SARH, 1981) esta unidad es de baja porosidad y permeabilidad.

ROCAS VOLCANICAS DEL TERCIARIO MEDIO (ØMv)

Las rocas tobáceas tienen fragmentos mal clasificados, de formas subredondeados en una matriz de piroclastos más finos, son rocas muy alteradas manifestado por una gruesa capa de arcilla hasta de 50 m. de espesor (Ortega, 1981). Debido a estas condiciones estas rocas son de baja permeabilidad.

Las rocas dacíticas que afloran al noreste de Amecameca son de baja permeabilidad, por presentarse en forma masiva, compactas y con gran desarrollo de fracturas prácticamente cerradas.

FORMACION TEPOZTLAN (Mtn)

Consta principalmente de lahares andesíticos compactos de baja porosidad y permeabilidad, con fragmentos mal clasificados, de formas angulosas y subangulosas en matriz de grano fino e interestratificadas con tobas arcillosas y compactas. También presenta en menor proporción pequeños lentes de grava y arena de mejor permeabilidad. Sin embargo la mejor permeabilidad pero no de importancia está desarrollada por su fractura--

miento.

COMPLEJOS VOLCANICOS DE CERRO FRIO Y TEPEXCO (Mi, Mb, Mt y - -
Øti2)

Estos complejos volcánicos forman derrames lávicos intercalados con piroclástos, cuya porosidad y permeabilidad considerable está sujeta a las condiciones de fracturamiento e intemperismo, así como de las condiciones de granulometría de los piroclástos, como por ejemplo las tranquiandesitas del Grupo -- Ixtlilco, en las cuales las condiciones de fracturamiento y alteración le caracterizan un comportamiento semipermeable. También existe un comportamiento de baja porosidad y permeabilidad, como lo muestran las ignimbritas compactas de la Formación Tlaica (Øti?), ya que presenta fragmentos de roca mal clasificados de forma angulosa en matriz de vidrio y grano fino, y por presentar un escaso o nulo facturamiento, o como las riocacitas compactas, caolinizadas y poco fracturadas del Grupo Tepexco -- (Mt).

FORMACION IZTACCIHUATL (Mpi) Y RIODOCITA POPOCATEPETL (PQp)

Según Ortega (1981), la andesita que cubre a los derrames lávicos inferiores de la Formación Iztaccihuatl, es de carácter masivo y compacto, con buena permeabilidad local debido a zonas de alto grado de fracturamiento. Los derrames inferiores se comportan con baja permeabilidad ya que teóricamente en este tipo de rocas a profundidad se disminuye la abertura del fracturamiento a causa del peso litológico suprayacente. Se puede decir que debido a su posición estratigráfica, esta --

formación se encuentra drenada en su mayoría.

La Riodacita Popocatepetl, consta principalmente de riodacitas compactas y fracturadas, que debido a su posición topográfica se encuentran drenadas.

FORMACION ZEMPOALA (Pz)

Esta unidad está constituida principalmente por andesitas de forma compacta y masiva, con poco grado de alteración, que forma zonas de alta permeabilidad local debido al alto grado de fracturamiento y que debido a su posición topográfica, se encuentran drenadas en su mayoría. También y en menor proporción se presentan intercalaciones de piroclástos y lahares arcillosos de menor permeabilidad.

FORMACION CUAYUCA (Mc)

La Formación Cuayuca consta principalmente de capas semiconsolidadas de limo y arcilla de baja permeabilidad, en menor proporción de capas de arena y grava de mejor permeabilidad.

Las calizas arcillosas y margas son consideradas de escasa permeabilidad. El yeso es definido como de baja permeabilidad, sin embargo puede obtener alta permeabilidad por disolución.

FORMACION TLAYECAC (Pt)

Forma capas masivas y poco compactas de lahares de aspecto brechoide, con fragmentos angulosos y subangulosos, mal clasificados con predominancia de tamaño grava y en una matriz arenosa. También presenta derrames lávicos de basaltos y andesitas fracturados. En conclusión esta formación representa zona de buena permeabilidad.

FORMACION CUERNAVACA (Pc)

Consiste principalmente en la parte septentrional de la formación de una secuencia de arenas poco consolidadas y de conglomerados poco compactos y poco cementados, con fragmentos de gravas redondeadas en matriz arenosa y con escaso contenido de arcilla. Debido a estas características esta secuencia representa zonas de alta porosidad y permeabilidad, sin embargo pueden variar las condiciones de granulometría para constituir zonas de menor permeabilidad. Por otro lado hacia el sur de la formación, los conglomerados son de menor permeabilidad, debido a que son de grano más fino. Las cenizas volcánicas y margas se consideran de escasa permeabilidad y los depósitos de travertino y yeso, tienen permeabilidad favorable en función de su grado de disolución.

GRUPO CHICHINAUTZIN (PQc)

Los factores más importantes que determinan zonas de alta porosidad y permeabilidad en las unidades volcánicas de es

te grupo son:

- a) Fracturas en basaltos
- b) Espacios intervesiculares en basaltos
- c) Tubos de lava y de explosión
- d) Secuencias de coladas de basaltos vesiculares y --
fracturados con escorias basálticas porosas
- e) Espacios porosos en el contacto entre coladas ba--
sálticas
- g) Materiales piroclásticos de diferente granulome- -
tría, asociados a conos volcánicos cineríticos
- h) Andesitas fracturadas

DEPOSITOS PIROCLASTICOS (Qp)

Productos piroclásticos permeables, constituidos por -
materiales de diferente granulometría desde ceniza hasta lapi--
lli, con un espesor considerable (Ortega, 1981).

DEPOSITOS CLASTICOS CONTINENTALES (PQdc)

Están constituidos por fragmentos de gravas gruesas --
subredondeadas en matriz arenosa, con escaso contenido de arci-
lla. Lo que constituye como una unidad de buena permeabilidad.
Sin embargo la permeabilidad puede variar al cambiar las condi-
ciones de la granulometría.

ALUVION (Qa1)

En la llanura aluvial de Cuautla-Yautepec consta de materiales permeables, debido al contenido de grava gruesa, con menor proporción arena, limos, arcilla y ceniza volcánica. En esta región se encuentran interdigitadas con los derrames basálticos permeables del Grupo Cichinautzin y consiguientemente de cansa sobre los derrames más antiguos. En otros lugares se encuentran relleno de dolinas y poljes.

ROCAS INTRUSIVAS (Tgc, Mdx y Mgj)

Generalmente este tipo de rocas son de baja porosidad y permeabilidad primaria, sin embargo llegan a desarrollar considerable porosidad y permeabilidad, debido al grado del fracturamiento e intemperismo. Como se muestran los troncos ígneos de Chalcatzingo, que consisten de una granodiorita (Mgj) compacta poco alterada y con fracturamiento abundante que le permiten tener una permeabilidad considerable.

VI.1.2 Análisis de los diferentes Tipos de Apertura

Debido a que todo tipo de apertura en la roca o material granular es el que controla el movimiento y almacenamiento de agua subterránea, se realizó durante los trabajos de campo un levantamiento de las características de estas aperturas, - - atendiendo a su origen, modificación, forma, abundancia, tamaño, persistencia y principalmente a su grado de interconexión. En la tabla No. VI.1 se muestra este análisis de los diferentes ti

VI.2 Características Hidráulicas de los Acuíferos

VI.2.1 Parámetros Hidráulicos

De acuerdo con S.A.R.H (Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Cuernavaca, 1980 y el Estudio Geohidrológico Preliminar de la zona de Cuautla y Yautepec Edo. de Morelos - - 1981), los parámetros hidráulicos de los únicos acuíferos analizados en la región se presentan en la tabla No. VI.3. De esta información se sabe que el coeficiente de transmisibilidad del acuífero en los materiales granulares de la Formación Cuernavaca, varía entre 0.51×10^{-3} a $98.08 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$, predominando los valores bajos. Su capacidad transmisora es entre media y baja, la variación de este parámetro puede deberse principalmente a cambios en la granulometría, al contenido de arcillas y al espesor irregular de esta unidad. El coeficiente de almacenamiento se calculó con un valor de 0.042, este valor clasifica a esta formación como un acuífero libre. Los gradientes hidráulicos en esta unidad acuífera varían entre 60×10^{-3} a 9×10^{-3} , esta variación es debida al control topográfico y a cambios de permeabilidad laterales.

Los valores de transmisibilidad de los materiales granulares (Qal) en las llanuras aluviales de Cuautla y Yautepec - varían entre 3.5×10^{-6} a $6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$, manteniéndose el promedio alrededor de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$, dicha variación es causada por cambios en la granulometría, aumento del contenido de arcilla y a la variación del espesor de estos materiales. El coeficiente de almacenamiento de esta unidad acuífera tiene un valor promedio de 0.01, que le caracteriza como un acuífero libre. Los gradientes hidráulicos en esta misma unidad, varían en la llanura aluvial de Yautepec entre 16×10^{-3} y 50×10^{-3} ,

y en las llanuras aluviales de Cuautla entre 16×10^{-3} y 66×10^{-3} , estas variaciones se deben principalmente a cambios de permeabilidad.

En el acuífero basáltico del Grupo Chichinautzin no se cuenta con sus parámetros hidráulicos, pero se deducen transmisibilidades altas debidas al alto grado de fracturamiento que presenta esta unidad, de la misma manera se le considera una baja capacidad almacenadora.

Por lo que respecta a los acuíferos en rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos tampoco se cuenta con valores de sus parámetros hidráulicos. Sin embargo se deducen transmisibilidades altas en función de su alta permeabilidad, debida a las condiciones de fracturamiento y de disolución, así como de los considerables caudales descargados en manantiales.

VI.2.2 Direcciones de Flujo Subterráneo

De acuerdo con la información recopilada de los estudios ya mencionados (SARH 1980, 1981), la dirección de flujo de agua subterránea en las llanuras aluviales de Cuernavaca es preferencialmente de norte a sur, tanto en el acuífero granular de la Formación Cuernavaca como en el acuífero por fisuración del Grupo Chichinautzin. Véase plano hidrogeológico anexo.

La dirección de flujo subterráneo en las llanuras del norte y sur de Cuautla, es principalmente de noreste a suroeste a través de las unidades acuíferas del Grupo Chichinautzin y depósitos aluviales. Por lo que respecta a la dirección de flujo subterráneo en las llanuras de Yautepec, este es generalmente de norte a sur, a través de las unidades acuíferas del Grupo --

Chichinautzin y aluvi3n. Finalmente y de acuerdo con la informaci3n obtenida (Ortega 1981), en el valle de Amecameca existe una direcci3n de flujo subterr3neo hacia el occidente, a trav3s de coladas bas3lticas del Grupo Chichinautzin, tambi3n existen direcciones de flujo hacia el norte y sur a trav3s de dep3sitos pirocl3sticos.

VI.2.3 Zonas de Recarga y Descarga

De acuerdo con la distribuci3n y magnitud de la precipitaci3n, temperatura ambiental, evaporaci3n y evapotranspiraci3n, y a la distribuci3n de las siguientes unidades hidrogeol3gicas: andesitas Zempoala, Grupo Chichinautzin y Formaci3n - Iztaccihuatl, que son permeables por fisuraci3n; las zonas m3s importantes de recarga de los acuíferos y acuitardos de la regi3n, por infiltraci3n del agua de lluvia y de los deshielos -- son: la Sierra Chichinautzin, Zempoala y Nevada.

Tomando en cuenta la distribuci3n y magnitud de los -- mismos par3metros climatol3gicos, y la distribuci3n de las unidades granulares permeables de la Formaci3n Cuernavaca, dep3sitos aluviales y pirocl3sticos, as3 como de la unidad permeable por fisuraci3n del Grupo Chichinautzin, las zonas de recarga de menor importancia por infiltraci3n directa del agua de lluvia -- son: las llanuras aluviales de Cuernavaca y Cuautla-Yautepec, y el Valle de Amecameca.

Según los análisis de las redes de flujo de los trabajos ya citados (SARH 1981, 1980), se contemplan dos aspectos:

a) En la zona sur de la llanura de Cuernavaca existe una zona de descarga subterr3nea de los acuíferos de la Forma--

ción Cuernavaca y del Grupo Chichinautzin, hacia las llanuras - aluviales de Zacatepec - Jojutla.

b) Los ríos Apatlaco y Cuautla son efluentes de los - acuíferos de la Formación Cuernavaca y aluvión.

Por supuesto que la principal forma de descarga natu-- ral de los acuíferos de la región, es la que se lleva a cabo -- por manantiales, los cuales en su mayoría brotan en basaltos -- del Grupo Chichinautzin.

En el Valle de Amecameca se encuentran tres zonas de - descarga subterránea, las cuales se localizan al norte, ponien-- te y sur del valle, y que fluyen en el subsuelo hacia el valle-- de Chalco las dos primeras y a la zona de Cuautla la tercera.

Finalmente es probable que la mayor parte de la recar-- ga de los acuíferos carbonatados de las formaciones Cuautla y - Morelos, se lleve a cabo en forma subterránea y lateralmente, - principalmente en zonas de contacto con las unidades acuíferas-- del Grupo Chichinautzin y Formación Cuernavaca. En menor pro-- porción existe una recarga subterránea de estos acuíferos carbo-- nados proveniente de los materiales granulares (Qal); así como-- una recarga vertical por infiltración del agua de lluvia, lleva-- da a cabo en las sierras de estas unidades carbonatadas. Las - únicas zonas de descarga conocidas en estos acuíferos carbonata-- dos se manifiesta en manantiales como por ejemplo: las Estacas, Atotonilco y Palo Bolero.

VI.3 Características de Manantiales

Durante los trabajos de campo se midieron los caudales

descargados por los diferentes manantiales, cuya localización se presenta en el plano hidogeológico anexo y su relación en la tabla No. VI.4.

De acuerdo con la clasificación de Meinzer, que se basa en la magnitud de los caudales descargados en manantiales; se realizó una clasificación de estos. Tomando esta clasificación los manantiales de Atotonilco y Las Estacas son de primera categoría; los manantiales de Chapultepec, Las Tazas, El Almeal y Agua Hedionda son de segunda categoría y por último los de Amecameca, Oaxtepec, Cocoyoc y Palo Bolero son de tercera categoría. También en la misma tabla se muestra el posible acuífero asociado con estos manantiales.

Existen manantiales (El Chapultepec y Cocoyoc) que son originados por cambios verticales y horizontales de la permeabilidad, ya sea en el contacto de derrames lávicos del Grupo Chichinautzin con la Formación Cuernavaca o con los depósitos clásticos del Grupo Balsas. Otros manantiales (Palo Bolero, Las Estacas y Atotonilco) que están controlados estructuralmente por fracturas, fallas o por planos de estratificación. Los manantiales de Las Tazas y El Almeal son provocados por la intersección de la topografía con niveles freáticos someros.

Otra característica es que la mayoría de los manantiales están asociados a la unidad acuífera de los basaltos del Grupo Chichinautzin y que junto con los caudales suministrados nos da una idea de la alta permeabilidad de esta unidad acuífera. De la misma manera los altos caudales de los manantiales de Palo Bolero y Las Estacas, apoyan la alta permeabilidad deducida para los acuíferos carbonatados de las formaciones Cuautla y Morelos.

VI.4 Estimación Comparativa entre el Caudal de Flujo Subterráneo en Medios Granulares (Qal) y el Caudal Descargado en el Manantial Las Estacas.

Con el objeto de establecer la posible continuidad - hidráulica entre las rocas volcánicas del Grupo Chichinautzín con las rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morellos; se calcularon los caudales de recarga y descarga en estas rocas carbonatadas. Para lograr esto, se seleccionó una área de balance (véase plano anexo) en función de la información -- hidráulica obtenida y considerando que el manantial Las Estacas se ubica dentro de esta área, ya que uno de los más caudalosos en estos medios carbonatados.

El procedimiento seguido para cumplir con este objetivo se desglosa a continuación:

La recarga horizontal se estimó, con el criterio de - la cantidad de agua subterránea que podría aportar los materiales aluviales a estas unidades carbonatadas; para lograr esta estimación se utilizó información piezométrica de una porción de la red de flujo (SARH 1981), así como de información hidráulica del acuífero aluvial (Qal), que junto con la aplicación - de la ley de Darcy, permitió calcular la recarga horizontal de la siguiente manera:

$$R_h = Q_c - Q_B = \left(T \frac{h}{L} a \right) - Q_B$$

donde:

R_h = Recarga horizontal hacia los acuíferos carbonatados, a través del medio granular (Qal).

Q_c = Caudal anual que pasa a través de la celda de balance (c). Véase plano anexo.

T = Transmisibilidad promedio de los materiales granulares (Qa_1), siendo de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$.

h = Diferencia de elevaciones entre las dos equipotenciales que limitan la celda de balance (c), con un valor de 50 m. Véase plano anexo.

L = Distancia horizontal entre las dos equipotenciales, que es de $1 \times 10^3 \text{ m}$.

a = Ancho promedio de la celda de balance (c), -- igual a $9 \times 10^3 \text{ m}$.

Q_B = Caudal anual de extracción en pozos ubicados -- dentro de la celda (c) y tomando de la información (S.A.R.H. - 1981).

Resultado:

$$\begin{aligned} Q_c &= 14191.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año} \\ Q_B &= 4103.9 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año} \\ R_h &= 10087.3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año} \end{aligned}$$

La recarga vertical (R_v), se calculó como el volumen de agua infiltrada al año, a través de las rocas calizas. Para ello se consideró una precipitación media anual (PM) dentro de la zona de balance de 900 m., un área aproximada aflorante (ACz) de las rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos, dentro de la zona del balance de $60.94 \times 10^6 \text{ m}^2$ y un coeficiente de infiltración máximo (I) para estos medios carbonatados del 40%, resultando que:

$$R_v = PM \cdot AC_z \cdot I$$

$$R_v = 21\,938 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$$

Posteriormente se calculó de recarga total (RT) en los acuíferos carbonatados de la siguiente forma:

$$RT = R_h + R_v$$

$$RT = 32025.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$$

Finalmente se calculó la descarga anual del manantial Las Estacas, resultando un caudal de $94609 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$.

De los resultados anteriores se observa que la recarga total solamente representa un 33.8% de la descarga de un solo manantial; por lo que dicha descarga no refleja una recarga proveniente del área aflorante de las rocas carbonatadas, ya que por otro lado es muy reducida, ni tampoco es producto de una recarga proveniente de los materiales aluviales (Qal). Tales deducciones apoyan la posible continuidad hidráulica entre las rocas volcánicas del Grupo Chichinautzin y las rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos; aunque estas formaciones se encuentran sobre yacidas inmediatamente por acuitardos (Formación Mexcala y Grupo Balsas) existe una importante recarga subterránea hacia estas unidades carbonatadas, debido a la gran área de captación y a la alta capacidad transmisora de la unidad del Grupo Chichinautzin, y a las considerables zonas de contacto entre ambas unidades permeables.

De la misma manera se piensa que la unidad acuífera de la Formación Cuernavaca, contribuye a una recarga subterránea hacia estos acuíferos carbonatados, preferentemente en donde existan zonas de contacto entre ambas unidades, y favorecida por la existencia de áreas más permeables por fracturamiento y disolución de las rocas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos.

VI.5 Funcionamiento Hidrogeológico

En este capítulo se conjuntan los aspectos de capítulos anteriores y las interpretaciones hidrogeoquímicas, para tratar de establecer lo más simplificado posible el funcionamiento hidrogeológico de la región estudiada.

Al ocurrir una precipitación o un deshielo en las sierras de Zempoala, Chichinautzin y Nevada, el agua se infiltra preferentemente en rocas fracturadas (basaltos del Grupo Chichinautzin, andesitas de las formaciones Zempoala e Iztaccíhuatl y riodacitas Popocatepetl), constituyéndose de esta manera las zonas más importantes de recarga de las unidades acuíferas y acuitardos de la región. Una vez alcanzada la zona de saturación el agua fluye subterráneamente en estas mismas rocas fracturadas de alta permeabilidad, hacia los valles y llanuras, siguiendo el patrón estructural, ya sea el fracturamiento preferencial o la dirección de derrames lávicos. La manifestación superficial de este flujo es debido a cambios verticales y horizontales de la permeabilidad, y debida a un control topográfico, esta misma manifestación origina una serie de manantiales (Cocoyoc, Chapultepec, Las Tazas, El Almeal), que en su mayoría se encuentran en la zona de transición de estas sierras y las llanuras aluviales e inclusive se encuentran en las mismas llanuras.

También este mismo flujo y en especial el de los basaltos fracturados del Grupo Chichinautzin, recarga en forma importante y subterráneamente a los acuíferos de la formación Cuernavaca, Aluvi6n y a los acuíferos carbonatados de las formaciones Cuautla y Morelos, formándose así en estos últimos un flujo de agua subterránea en medio carbonatados de alta permeabilidad, posiblemente controlado y manifestado en superficie (manantiales de

Palo Bolero, Las Estacas y Atotonilco) por un control estructural ya sea por fallas, fracturas, planos de estratificación, -- etc.

Igualmente se ha definido una continuidad hidráulica entre las rocas volcánicas fracturadas ya mencionadas y el acuitardo del Grupo Balsas (conglomerados calizos, secuencia limo-arcillosa y depósitos yesíferos), a través de un flujo de agua subterránea - en estratos profundos y manifestado en manantiales (Agua Hedionda y Oaxtepec), por medio de un control estructural (fallas).

De la misma manera se piensa que probablemente el acuitardo del Grupo Balsas recarga regionalmente a los acuíferos carbonatados de la región.

Por otra parte existe en menor proporción una recarga de los -- acuíferos de la región, causada por la infiltración directa del agua de lluvia en los valles y llanuras, como también en las -- sierras formadas por rocas carbonatadas y fracturadas de las -- formaciones Cautla y Morelos.

El agua en las zonas de mayor recarga, también escurre superficialmente hacia los valles y llanuras, hasta que se infiltra en depósitos granulares de relleno.

En la figura VI.1 se presenta en forma generalizada el funcionamiento hidrogeológico de la región estudiada, y en donde se observa el control geológico del comportamiento subterráneo y superficial del agua.

TABLA No. VI.1
CONDICIONES DE LOS TIPOS DE ABERTURA

FORMACION O GRUPO	TIPO DE ABERTURA	PRIMARIA O SECUN- DIARIA	MODIFI- CACION	FORMA	ABUNDANCIA	TABASO Y ABER- TURA	GRADO DE INTERCO- NEXION	PERSISTEN- CIA	OBSERVACIO- NES
Xochicatco	F	S	ACC	R	P	MPA	B	MP	PT
Morelos	HD	S	ARA	I	A	VA	M		
	JS	S	PRAC, AD	P, T	A	MPA	A	M	
Cuautla	HD	S	ARA	I	A	VA	M		
	F	S	ACC	R	P	MA	B	P	PT
Mexcala	PIA	S	CC	I	P	MI	B		
	L	S	PIA	P	M	M	B	B	
	PIL	S	CC	I	P	MI	B		
	F	S	RA	I	P	M	B	B	PT
Balsas	PIG	S	RA, CCO	I	P	M	B		
Tilzapotla	F	P	RA	I	P	M	B	B	
Rocas Volcánicas del Terciario me- dio	PIP	S	RPI	I	P	M	B		
	F	P	RA	C	M	MC	B	G	
Tepoztlán	PIP	S	RF, RM	I	P	MI	B		
	F	S	AE	R	A	G	B	G	PST

TABLA No. VI.1
CONDICIONES DE LOS TIPOS DE ABERTURA

FORMACION O GRUPO	TIPO DE ABERTURA	PRIMARIA O SECUN- DARIA	MODIFICA- CION	FORMA	ABUNDANCIA	TAMANO Y ABER- TURA	GRADO DE INTERCO- NEXION	PERSIS- TENCIA	OSER- VACIONES
Ixtlilco	F	P	A D P R A	T, P	A	M A		G	
Tlalco	V	P	R C	I	P	P	B		
Tepexco	F	P	R Co	I	P	MC	B	P	
Iztocchuatl	F	P	AD	R	M	M	A	G	
Zempoala	F	P	AD PRA	T, P	M	MA	A	G	
Cuayuca	PIL	P	RA	I	P	P	P		
Tlayecac	PIG	S	RA	I	P	P	B		
Cuernavaca	PIG	S	RS	I	M	M	A		
Chichinautzin	F	P	AD	T, P	M	M	A	G	
	VB	P	SRO	E	M	M, M	M		
	TEB	P		D	A	M	M		
	ECB	P		I	M	M	A		
	EIP	P		I	M	M	A		
	FA	P	AP, PA	I	M	M	A	G	
Aluvi6n (PQdc)	PIG	P	RA	I	M	M	M		

TABLE No. VI.1
CONDICIONES DE LOS TIPOS DE ABERTURA

FORMACION o GRUPO	TIPO DE ABERTURA	PRIMARIA O SECUNDARIA	MODIFICACION	FORMA	ABUNDANCIA	TAMANO Y ABERTURA	GRADO DE INTERCONEXION	PERSISTENCIA	OBSERVACIONES
Aluvión(Qal)	PIG	P	PRS	I	M	M	A		
Piroclastos (Qp)	PIP	P	RF	I	M	M	A		
Granodiorita (Mg)	FE	P	AD,PRA	I	M	MA	M	A	
	FD	S	PRA	P	M	MPA	M	A	
	HD	S	AD	E	A	M	B		

CLAVES:

TIPO DE ABERTURA

HD = Huecos de disolución
 JS = Juntas sistemáticas (diaclasas)
 PIA = Poros intergranulares en arenas
 I = Laminación
 PIL = Poros intergranulares en limos
 PIG = Poros intergranulares en gravas
 F = Fracturamiento
 PIP = Poros intergranulares en piroclastos
 V = Vesículas
 FA = Facturas en andesitas
 VB = Vesículas en basaltos
 TEB = Tubos de explosión en basaltos

ECB = Espacios entre coladas basálticas
 EIP = Espacios intergranulares en piroclastos

MODIFICACION

ACC = Algunas cementadas por CaCO_3
 ARA = Algunas rellenas por arenas y agravas
 AD = Ampliadas por disolución
 PRAC = Parcialmente rellenas por arcilla y por CaCO_3
 CC = Cementadas por CaCO_3
 PRA = Parcialmente rellenas por arcilla
 RA = Rellenadas por arcilla
 CCO = Cementadas por CaCO_3 y FeO
 RC = Rellenados por calcodonita

CLAVES:

TIPO DE ABERTURA

RF = Rellenados por finos
RM = Rellenados por microcristales
AE = Ampliadas por erosión
RC = Cementadas por calcedonia
PCo = Rellenadas por caolín
RS = Rellenados por arenas
SRO = Sin relleno observable
PRS = Parcialmente rellenos por arenas

FORMAS

R = Regular
I = Irregular
P = Planar
T = Tabular
C = Columnar
E = Esférica

Abundancia

MP = Muy pocas
A = Algunos
P = Pocos
M = Muchos

RPF = Rellenados por piroclastos finos

G = Grandes

GRADO DE INTERCONEXION

B = Bajo

M = Medio

A = Alto

Persistencia

MP = Muy poco

M = Medio

P = Poco

B = Bajo

Observaciones

PT = Perpendicular a la estratificación

PST = Perpendicular a la pseudoestratificación

TAMBIEN COMUNES

MFA = Microscópicas poco abiertas

VA = Desde unos cm. hasta 3 km

MA = Macroscópicas abiertas

Mi = Microscópicas

Mc = Microscópicas cerradas

M = Macroscópicas

TABLA No. VI.2
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

FORMACION O GRUPO	ACUIFERO	ACUITARDO
Xochicalco		✓
Morelos (2)	✓	
Cuautla (2)	✓	
Mexcala		✓
Balsas (3)		✓
Riolita Tlzapotla		✓
Rocas Volcánicas del Terciario medio		✓
Tepoztlán		✓
Ixtlilco (1)		✓
Tlaico		✓
Tepexco		✓
Zempoala (4)	✓	
Iztaccihuatl (4)	✓	
Riodocita Popocatepetl (4)	✓	
Cuayuca		✓
Cuernavaca	✓	
Aluvi6n (PQdc)	✓	
Chichinutzin	✓	

TABLA No. VI.2
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

FORMACION O GRUPO	ACUIFERO	ACUITARDO
Aluvión (Qol)	✓	
Piroclásticos (Qp)	✓	
Granito (Tgc)		✓
Diorita (Mdx)		✓
Granodiorito Mgj (1)		✓
Tlayécac	✓	

NOTA:

- (1) Acuitardo en rocas ígneas, que por su densidad de fracturamiento puede funcionar como acuífero localmente.
- (2) Acuífero en rocas carbonatadas, localmente puede funcionar como acuitardo.
- (3) Acuitardo en medio granular que localmente puede ser acuífero de bajo rendimiento
- (4) Acuífero drenado

TABLA No. VI.3
 PARAMETROS HIDRAULICOS
 (S.A.R.H. 1980y 1981)

Unidad acuífera	$T \times 10^{-3}$ m ² /seg	S	$i \times 10^{-3}$
Formación Cuernavaca	0.5 a 98.08	0.042	9 a 60
Aluvión (Qol) en la Llanura de Cuautla - Yautepec	0.0035 a 6.5	0.01	16 a 66

T = Coeficiente de Transmisibilidad

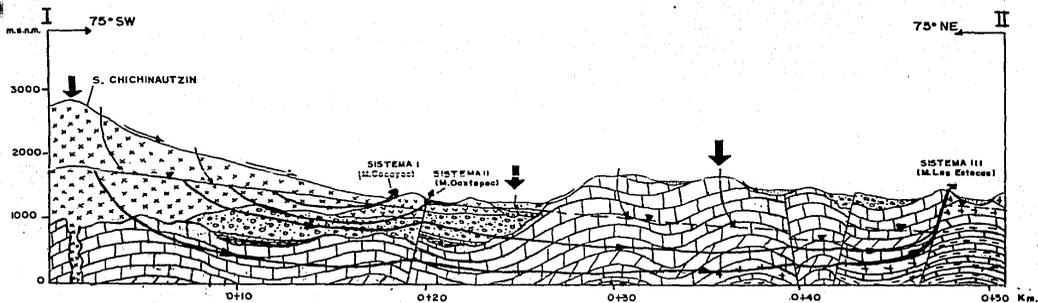
S = Coeficiente de Almacenamiento

i = Gradiente Hidráulico

TABLA No. VI.4
 CARACTERISTICA DE MANANTIALES

No.	NOMBRE	CAUDAL MEDIDO L.P.S (FEB 1950)	CAUDAL ANUAL $m^3 \times 10^6$	ACUIFERO ASOCIADO (Litología en donde brotan)
1	Anecameca	60	1.89	Andesitas (Mpi)
2	Centro Vacacional de Oaxtepec	200	6.57	Basaltos (PQc)
3	Cocoyoc	40	1.26	Basaltos (PQc)
4	Chapultepec	1 500	41.04	Basaltos (PQc)
5	Las Tazas	642	20.34	Basaltos (PQc)
6	El Almeal	940	29.14	Basaltos (PQc)
7	Agua Hedionda	850	25.5	Basaltos (PQc)
8	Las Estacas	3 000	94.60	Calizas (Km)
9	Palo Bolero	94	2.96	Calizas (Km)
10	Atotonilco	3 000	94.6	Calizas (Kc)
		M	317.6	

Fig.VI.1 Sección Hidrogeológica Idealizada



EXPLICACION

- ARENAS Y GRAVAS (Qa1)
- BASALTOS Y ESCORIAS (Poc)
- LENTES DE YESO (z6b)
- CONGLOMERADOS (E6b)
- ARENISCAS, LUTITAS Y LIMOLITAS (Kms)
- CALIZAS (Ka y Km)
- DOLOMIAS (Km)
- ANHIDRITAS (Km)
- CALIZAS Y LUTITAS (Ks)

- PRECIPITACION
- DIRECCION DE FLUJO DEL AGUA
- NIVEL FREATICO
- NIVEL FREATICO INFERIDO

Escala Vertical 1:50000
Escala Horizontal 1:200000

VII HIDROGEOQUIMICA

VII.1 Introducción

En el presente capítulo se establecen las características, distribución, origen e implicaciones hidrogeológicas de los distintos parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas de los principales manantiales de la región; con el objeto de apoyar o ampliar el modelo de funcionamiento hidrogeológico de la región estudiada, establecido en el subcapítulo VI.5.

VII.2 Trabajo de Campo

Dentro de esta actividad se llevó a cabo la toma de -- muestras para análisis físico-químicos de las aguas subterráneas, principalmente en manantiales; cuya selección de muestreo se realizó en función de: la distribución de los manantiales en los distintos ambientes geológicos de la región, en la importancia de las caudales descargados y en función de obtener un muestreo representativo de la región estudiada. La localización de los puntos muestreados se presenta en el plano hidrogeológico - anexo y su relación con la tabla No. VII.1.

La metodología de muestreo consistió en la toma de -- muestras en envases con capacidad de 1 ℓ y 250 ml, previamente enjuagados con agua muestreada, posteriormente se les agregó un conservador (HNO₃ diluido 1:10) para evitar las precipitaciones de iones metálicos, posteriormente las muestras se etiquetaron con la siguiente información: número de muestra, lugar de mues-

treo, tipo de aprovechamiento muestreado, fecha y hora del muestreo, finalmente las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la - - - U.N.A.M. para sus respectivos análisis en un mínimo de tiempo - de 48 horas.

Durante esta etapa del muestreo se detectó en los manantiales de Oaxtepec, Agua Hedionda y Palo Bolero un fuerte olor a ácido sulfhídrico, por lo que consecuentemente se llevó a cabo un nuevo muestreo especial en estos manantiales, para la determinación de azufre ($S^{=}$) en laboratorio. Conjuntamente al muestreo también se midieron las siguientes propiedades físicas de las aguas subterráneas: concentración de hidrogeniones - (Ph) mediante el método colorimétrico, conductividad eléctrica (C.E) por medio de un conductímetro portátil y la temperatura (T) a través de un termómetro de mercurio. Los resultados de estas mediciones se presentan en la tabla No. VII.1.

VII.3 Análisis Físico-Químicos

Los análisis físico-químicos solicitados y analizados en laboratorio fueron los siguientes: contenido de hidrogeniones (Ph), conductividad eléctrica (C.E.), sólidos totales disueltos (S.T.D.), dureza total (DZAT), alcalinidad total (ALCT), sílice (SiO_2), boro (B), calcio (Ca^{++}), sodio (Na^+), magnesio - (Mg^{++}), hierro (Fe^{++}), potasio (K^+), carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{-2}), cloro (Cl^-), fluor (F^-), nitrato - (NO_3^-) y azufre ($S^{=}$). Este tipo de análisis solicitados fue debido al conocimiento del ambiente geológico volcánico, sedimentario marino y continental de la región, a lo comunmente usual de este tipo de análisis en los estudios hidrogeoquímicos de aguas subterráneas y a la detección de iones anómalos en la eta

pa del muestro. Los resultados de dichos análisis se presentan en la tabla No. VII.2.

Los métodos de análisis que se aplicaron en laboratorio para la determinación de los distintos parámetros físicoquímicos fueron los siguientes:

TIPO DE ANALISIS

METODO DE ANALISIS

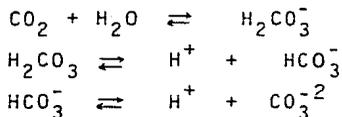
Ph	Potenciometría
C.E.	Conductimetría
S.T.D.	Gravimetría
ALCT	Volumetría
DZAT	Volumetría
SiO ₂	Colorimetría
B	Colorimetría
Ca ⁺⁺	Volumetría
Na ⁺	Flamometría
Mg ⁺⁺	Volumetría
Fe ⁺⁺	Colorimetría
K ⁺	Flamometría
CO ₃ ⁻²	Volumetría
HCO ₃ ⁻	Volumetría
SO ₄ ⁻²	Turbidimetría
F ⁻	Potenciometría
NO ₃ ⁻	Colorimetría
S ⁼	Colorimetría
Cl ⁻	Potenciometría

VII.4 Características y Distribución de los Parámetros Físico-Químicos.

CONCENTRACION DE HIDROGENIONES (Ph)

a) Características

El Ph indica la actividad del ion hidrógeno y está dado por la fórmula $Ph = -\log H^+$. La variabilidad del grado del Ph en las aguas subterráneas está relacionado a las reacciones químicas llevadas a cabo, por ejemplo y una de las más importantes es la disolución del CO_2 y la consecuente disociación del ácido carbónico que ocasiona un ambiente ácido.



Generalmente el rango de Ph en las aguas subterráneas varía entre 6 a 8.5 (1), esta variabilidad es debido a la existencia de sustancias "buffer" y que en las aguas subterráneas están dadas por la presencia del CO_2 , CO_3H^- y H_3CO_2 , la característica de estas sustancias es que al inhibir el agua ácidos o bases fuertes mantienen constante el rango de Ph de las aguas subterráneas.

(1) Hem. 1970.

b) Distribución

Los valores más bajos de Ph en las aguas subterráneas del área en estudio y observados en la tabla No. VII.1, se presentan en las manantiales 1,3,4,5,6 y en las lagunas 11 y 12 -- con un rango de valores entre 5.9 a 6.8. Los valores intermedios varían entre 7.0 a 7.1 presentándose en los manantiales -- 8,9 y 10. En los manantiales 2 y 7 se presentan los valores -- más altos y son de 7.4 y 7.2 respectivamente.

Temperatura (T)

a) Características

La temperatura se define como el potencial calorífico referido a un cierto origen, por ejemplo la temperatura de fusión del hielo. Las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable y responden a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, incrementando en el producto de la profundidad por el gradiente geotérmico (1°C cada 33 m en promedio), algo mayor en zonas tectónicas o volcánicas y algo menor en grandes cuencas sedimentarias (2).

b) Distribución

Los valores más bajos de la temperatura en las aguas -

subterráneas del área en estudio varían entre 6 a 18.7°C en los manantiales 1,3,4,5,6 y en la laguna 12. Los valores intermedios se presentan en los manantiales 2,7,8 y 9 con un rango entre 22.5 y 26.4. Los valores más altos con cantidades de -- 32.5 y 30°C se presentan en el manantial 10 y en la laguna 11.

Conductividad Eléctrica (C.E.)

a) Características

La conductividad eléctrica es la capacidad de una agua para conducir electricidad, dicha conductividad crece con la -- temperatura y con el contenido de iones disueltos, y no influye solamente la concentración iónica si no también el tipo de -- iones disueltos. La conductividad eléctrica de las aguas subte-- rráneas se incrementa proporcionalmente al incrementarse la con-- centración de Cl^- , SO_4^{2-} y la dureza del agua op. cit. (1). Los valores varían entre 100 y 2000 $\mu s/cm$ a 18°C para aguas dulces, pudiendo llegar a más de 100,000 en salmueras, en el agua de -- lluvia las concentraciones varían entre 140 a 625 $\mu s/cm$ op. -- cit. (2).

b) Distribución

El rango de valores más bajos de la C.E. en las aguas-- subterráneas del área en estudio y observados en la tabla No. - VII.1 varían entre 86 y 292 $\mu mhos/cm$ en los manantiales 1,3,- 4,5,6 y en la laguna 12. Los valores intermedios varían entre 1250 y 2100 $\mu mhos/cm$ en los manantiales 9,10 y 11. Por otro -

lado los valores más altos se presentan en los manantiales 2,7- y en la laguna 11 con un rango entre 3000 y 3430 μ mhos/cm.

Sólidos Totales Disueltos (S.T.D.)

a) Características

El total de sales o sólidos totales disueltos mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua, volátiles o no volátiles, en base a este parámetro se pueden clasificar las aguas subterráneas del área de estudio de la manera siguiente:

CLASIFICACION (DAVIS Y DE WIEST 1966)	S.T.D. p.p.m.	MUESTRA No.
Agua Dulce	0 - 1000	1,3,4,5 y 6
Agua Salobre	100 - 10,000	2,7,8,9,10 y 11
Agua Salada	10,000 - 100,000	
Salmuera	> 100,000	

b) Distribución

Los valores más altos de los S.T.D. en las aguas subterráneas del área en estudio se presentan en los manantiales 2,7 y en la laguna 11 con valores entre 3226 y 2607 mg/l. Los valores intermedios varían entre 955 y 2038 mg/l en los manantiales 8,9 y 10. En los manantiales 1,3,4,5 y 6 se presentan los valores más bajos con un rango entre 198 y 362 mg/l.

Alcalinidad Total (ALCT)

a) Características

La alcalinidad es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos, en muchas de las aguas subterráneas la alcalinidad es prácticamente producida por la disolución de los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- . Las unidades se presentan en mg/l de CaCO_3 , los rangos generalmente varían en las aguas subterráneas entre 100- y 300 mg/l de CaCO_3 , pudiendo llegar a 500 y excepcionalmente a 1000 op. cit. (2)

b) Distribución

Los valores más bajos de la ALCT en las aguas subterráneas del área en estudio varían entre 88 y 319 mg/l de CaCO_3 en los manantiales 1,3,4,5 y 6. Los valores intermedios se presentan en los manantiales 8,9,10 y en la laguna 11 con un rango entre 380 y 609 mg/l de CaCO_3 . En los manantiales 2 y 7 se presentan los valores más altos y son de 1421 y 1308 mg/l de CaCO_3 respectivamente.

Dureza Total (DZAT)

a) Características

La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones, las definiciones la indican -

con el contenido de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$), las unidades se expresan en mg/l de CaCO_3 . Generalmente los valores en las aguas subterráneas varían entre 10 y 300 p.p.m. de CaCO_3 , pudiendo llegar a 1000 y excepcionalmente a 2000, en el agua de lluvia las concentraciones varían entre 80 y 210 p.p.m. op. cit. (2).

b) Distribución

Los valores más bajos de la DZAT en las aguas subterráneas del área en estudio y presentados en la tabla No. VII.2 varían entre 54 y 146 mg/l de CaCO_3 en los manantiales 1,3,4,5- y 6. Los resultados intermedios oscilan entre 645 y 1099 mg/l- en los manantiales 8,9 y 10. Los valores más altos varían entre 1738 y 1910 mg/l en los manantiales 2, 7 y en la laguna 11.

Silicio (SiO_2)

a) Características

La hidrogeoquímica del silicio no está del todo aclarada, pero se cree que la mayoría del silicio se encuentra en la forma SiO_4H_4 en parte disuelto y en parte coloidal. La mayoría del silicio disuelto en forma iónica es SiO_3^{-2} y una pequeña parte en forma SiO_4H_3^- . El cuarzo y sus formas alotrópicas son muy poco solubles, generalmente el silicio precipita a Ph bajos, para fines prácticos la representación del silicio disuelto es en la forma SiO_2 . En las aguas subterráneas las concentraciones de SiO_2 son de algunas decenas de mg/l y en aguas ácidas y-

termales se logran alcanzar varios cientos de mg/l (3)

b) Distribución

Los valores de SiO_2 en las aguas subterráneas del área en estudio varían entre 44 y 109 mg/l, presentandose el valor más bajo en el manantial 9 y el más alto en la laguna 11.

Boro (B)

a) Características

Aunque es un constituyente menor de las aguas, es muy importante en la agricultura para el crecimiento de las plantas en pequeñas cantidades y dañino en exceso. El boro se encuentra disuelto en las aguas subterráneas como BO_3H_3 y parcialmente disociado como BO_3H_2^- . Según (4) las concentraciones normales de boro (B) en las aguas subterráneas varían entre 0.01 y 1 p.p.m., las concentraciones más altas se han reportado en manantiales termales ubicados en terrenos volcánicos y con valores hasta de 600 mg/l op. cit. (1).

b) Distribución

Los valores de boro (B) en las aguas subterráneas del-

área en estudio varían entre 0.04 y 1.6 mg/l, presentándose los valores más altos en los manantiales 2 y 7, y los más bajos en el manantial 4.

Calcio (Ca^{++})

a) Características

Es un elemento moderadamente soluble a muy soluble, -- precipita muy fácilmente como CaCO_3 , su química está muy ligada a los iones CO_3H^- , CO_3^{-2} y SO_4^{-2} en muchas de las aguas naturales, precipita y se disuelve con facilidad al cambiar el Ph, la temperatura y la presión parcial del CO_2 . En terrenos carbonatados (calizas, dolomías, etc.) las concentraciones de Ca^{++} en las aguas subterráneas varían entre 40 y 60 mg/l, y más comúnmente alrededor de 50 mg/l op. cit. (5). Las concentraciones asociadas a terrenos evaporíticos (yesos, anhidritas, etc.) se acompaña de sulfatos con concentraciones hasta de varios centenarios de mg/l de Ca^{++} op. cit. (3). Por otro lado las concentraciones en el agua de lluvia varían entre 0.1 y 5 p.p.m. op. cit. (2).

b) Distribución

Los valores más bajos de Ca^{++} en las aguas subterráneas del área en estudio y presentados en la tabla No. VII.2 -- varían entre 6 y 16 mg/l en los manantiales 1,3,4,5 y 6. Los valores intermedios se presentan en los manantiales 8,9,10 y en

(4) Davis y De Wiest 1966.

(5) Freeze and Cherry. 1979.

la laguna 11 con un rango entre 160 y 333 mg/l. En los manantiales 2 y 7 se presentan los valores más altos, con valores de 540 y 488 mg/l respectivamente.

Sodio (Na^+)

a) Características

Este elemento presenta una solubilidad muy elevada, es bastante difícil de precipitar, suele ir asociado al cloro (Cl^-), es fácilmente adsorbido por arcillas. La forma iónica más común en solución es Na^+ pero se puede presentar en forma de $\text{Na} - \text{CO}_3$, Na HCO_3 y NaSO_4 . Las concentraciones de sodio Na^+ en aguas subterráneas dulces varían entre 1 y 150 p.p.m. y en el agua de lluvia entre 0.3 y 3 p.p.m. opc. cit. (2).

b) Distribución

Las concentraciones más altas de Na^+ en las aguas subterráneas del área en estudio se muestran en los manantiales 2, 7 y en la laguna 11 con un rango entre 75 y 109 mg/l. Los valores más bajos varían entre 7 y 18 mg/l en los manantiales 1,3,4,5 y 6. En los manantiales 8,9 y 10 los valores varían entre 21 y 54 mg/l.

Magnesio (Mg^{++})

a) Características

Las propiedades de este elemento son similares a las del calcio, pero es más soluble y algo más difícil de precipitar, y se disuelve más lentamente. La forma iónica más usualmente en solución es Mg^{++} . Las concentraciones de Mg^{++} en las aguas subterráneas asociadas a calizas o calizas dolomíticas varían entre 10 y 60 mg/l, aunque es normalmente inferior de 50 mg/l op. cit. (5). En rocas ricas en magnesio (basaltos de olivino y dolomías) las concentraciones son dos o tres veces más que las concentraciones de calcio, pudiendo llegar hasta 100 p.p.m. de magnesio, mientras que las concentraciones más comunes son de 1 a 14 p.p.m. op. cit. (4). También las altas concentraciones de magnesio se han reportado en aguas subterráneas asociadas a depósitos evaporíticos, op. cit. (1). El agua de lluvia normalmente contiene de 0.1 a 2 p.p.m. de magnesio op. cit. (2).

b) Distribución

Los valores más bajos de Mg^{++} en las aguas subterráneas del área en estudio varían entre 9 y 26 mg/l en los manantiales 1,3,4,5 y 6. Los valores intermedios se presentan en los manantiales 8,9 y 10 con un rango entre 59 y 64 mg/l. Los valores más altos se presentan en los manantiales 2,7 y en la laguna 11 con valores de 134, 139 y 242 mg/l respectivamente.

Fierro (Fe^{++})

a) Características

Es un elemento que se solubiliza y precipita fácilmente, su química es relativamente compleja pues puede existir en los estados de valencia +2 y +3. La estabilidad de las diferentes formas iónicas, precipitados o coloidales, dependen del Ph, Eh y de la composición de la solución. La forma iónica más común en solución en las aguas subterráneas es Fe^{++} , aunque también se presenta la forma FeOH . Las concentraciones de iones - (Fe^{++}) en las aguas subterráneas varían entre 1 y 10 p.p.m. op. cit. (4).

b) Distribución

Los valores de Fe^{++} en las aguas subterráneas del área en estudio varían entre 0.4 y 1.6 mg/l, presentandose las más altas en los manantiales 1,2 y 7, y el más bajo en el manantial-4 .

Potasio (K^+)

a) Características

Este elemento tiene una solubilidad muy elevada, es difícil de precipitar, es afectado fácilmente por el cambio de ba

ses y es adsorbido en forma muy irreversible por arcillas para formar parte de su estructura, es difícilmente liberado por minerales silicatados en especial de los feldepatos ya que son -- muy resistentes al ataque del agua. Las concentraciones de K^+ en las aguas subterráneas suelen ser de algunas mg/l hasta algunas decenas de mg/l op. cit. (3). Los valores más altos de K^+ se encuentran en aguas subterráneas en contacto con sales potásicas contenidas en depósitos evaporíticos op. cit. (1). El agua de lluvia presenta valores bajos alrededor de 0.1 p.p.m. - Op. cit. (4).

b) Distribución

Las concentraciones de K^+ en la región estudiada varían entre 5 y 44 mg/l presentándose los valores más altos en los manantiales 2,7 y en la laguna 11, la concentración más bajas se presentan en el manantial 4.

Carbonatos (CO_3^{-2}) y Bicarbonatos (HCO_3^-)

a) Características

Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que le proporcionan capacidad de consumo de ácidos, no son oxidables ni reducibles en aguas naturales, la forma CO_3^{-2} precipita con mucha facilidad en forma de $CaCO_3$. El ion CO_3^{-2} en aguas subterráneas está en concentraciones mucho menores que el bicarbonato y si el Ph es menor que 8.3 se le considera cero. Las concentraciones de bicarbonato en las aguas subterráneas va

rían entre 10 y 800 p.p.m. con valores más frecuentes entre 50- y 400 p.p.m. op. cit. (4). El agua de lluvia presenta valores de bicarbonato alrededor de 10 mg/l y algunas veces menores de 1 mg/l op. cit. (1).

b) Distribución

Las concentraciones de carbonatos en las aguas subterráneas de los manantiales del área de trabajo es cero, pero en el lago de Tequesquitengo se tiene un valor de 68 mg/l.

Los valores más bajos de bicarbonatos en las aguas subterráneas varían entre 60 y 197 mg/l en los manantiales 1,3,4,5 6 y en la laguna 11. En los manantiales 8,9 y 10 se presentan los valores intermedios con un rango entre 283 y 421 mg/l. Los valores más altos se presentan en los manantiales 2 y 7 con concentraciones de 867 y 798 mg/l respectivamente.

Sulfatos (SO_4^{-2}) y Azufre (S^{-2})

a) Características

El elemento azufre cuando es disuélvulo en agua generalmente ocurre en forma oxidada (S^{+6}) o en estado complejo con el oxígeno en forma de sulfato (SO_4^{-2}), que es moderadamente soluble a muy soluble, y difícil de precipitar. En medio ambiente reductor con abundante materia orgánica el ion sulfato puede sufrir una reducción bacteriana a la forma S o S^{-2} , esta última forma se hidroliza muy fácilmente a SH^- y SH_2 (ácido sulfhídrico).

co). Las concentraciones de sulfato en las aguas varían entre 0.2 y 100,000 mg/l op. cit (4), las concentraciones más bajas se encuentran en el agua de lluvia o en zonas de reducción de sulfatos y las más altas se encuentran asociadas a salmueras. Las concentraciones de S^{-2} en las aguas subterráneas son menores que 1 mg/l y en medios reductores con reducción de sulfatos las concentraciones alcanzan hasta 100 mg/l op. cit. (2).

b) Distribución

Los valores más altos de sulfato en el área de estudio se presentaron en la laguna 11 y en los manantiales 2 y 7 con un rango de valores entre 1880 y 1085 mg/l. Los valores intermedios se tienen en los manantiales 8, 9 y 10 con cantidades entre 377 y 720 mg/l. Los valores más bajos oscilan entre 0 y 41 mg/l en los manantiales 1,3,4,5 y 6. Las concentraciones de S^{-2} únicamente se determinaron en los manantiales 2,7 y 9 con resultados de 0.58, 0.80 y 0.84 mg/l respectivamente.

Cloro (Cl^{-})

a) Características

El elemento cloro es del grupo de los halógenos, generalmente se presenta como ion Cl^{-} que es muy soluble, muy estable en solución y difícil de precipitar, no se óxida ni se reduce en aguas naturales, casi nunca llega a saturar y frecuentemente va asociado con el ion Na^{+} , el cloro en solución es un fuerte agente oxidante. Las concentraciones de cloro (Cl^{-}) en-

agua marina atrapada en el interior de los sedimentos y de la disolución de sal común son respectivamente superiores a 1g/l y de algunas decenas de g/l hasta 200 g/l op. cit. (3). Concentraciones hasta de varias centenas de mg/l están asociadas a manantiales termales y a emanaciones volcánicas op. cit. (1). El agua de lluvia contiene entre 1 y 3 p.p.m. de Cl^- op. cit. (4).

b) Distribución

En el área de estudio las concentraciones de Cl^- más altas varían entre 55 y 128 mg/l en la laguna 11 y en los manantiales 2 y 7. Los valores intermedios varían entre 20 y 25 mg/l en los manantiales 8,9 y 10. En los manantiales 1,3,4,5 y 6 se presentan los valores más bajos con un rango entre 4.3 y 7.2 mg/l.

Fluor (F^-)

El elemento fluor pertenece al grupo de los halógenos, es el más electronegativo de todos los elementos, la forma más común en solución es F^- , la cual no se presenta en estado de oxidación en las aguas naturales y presenta una solubilidad baja. Con Ph de 3.5 la forma más común es HF° y en aguas ácidas es posible la presencia de las formas $\text{SiF}_6^{=}$ y SiF_4° op. cit. (1). Las concentraciones más comunes del ion fluoruro (F^-) generalmente oscilan entre 0.01 y 10 p.p.m. op. cit. (4), en aguas afectadas por actividad volcánica se han reportado valores más altos op. cit. (1).

b) Distribución

Los valores de fluor (F^-) en las aguas subterráneas -- del área en estudio varían entre 0.5 y 1.6 mg/l, presentandose los valores más altos en los manantiales 2 y 7, y los más bajos en el manantial 1.

Nitrato (NO_3^-)

a) Características

El nitrato (NO_3^-) es la forma más común del nitrógeno en las aguas subterráneas, esta forma iónica se caracteriza por su alta solubilidad, bajo grado de precipitación y tiende a ser estable aun en ambientes reductores. Las concentraciones normales de NO_3^- en las aguas subterráneas varían entre 0.1 y 10 p.p.m. y en las aguas de lluvias entre 0.1 y 0.3 p.p.m. op. cit. -- (4).

b) Distribución

Los valores de nitrato (NO_3^-) en las aguas subterráneas del área de trabajo varían entre 2.1 y 9.7 mg/l, presentan el valor más bajo en el manantial 9 y el más alto en el -- manantial 5.

VII.5 Presentación de Resultados

VII.5.1 Sistemas de Manantiales

En base a la variabilidad de los rangos de valores de los datos físicos de las aguas subterráneas de los distintos -- manantiales de la región estudiada y presentados en la tabla -- No. VII.1, se realizó una diferenciación de tres sistemas diferentes como se muestra en la Tabla No. VII.3.

El sistema I corresponde a manantiales relativamente -- fríos ubicados en su mayor parte en la zona de transición entre la Sierra Chichinautzin y las llanuras aluviales de Cuernavaca- y Cuautla-Yautepec; caracterizados por valores bajos de Ph, con ductividad eléctrica (C.E.) y temperatura (T) en sus aguas sub- terráneas.

El sistema II comprende a manantiales cuyas aguas sub- terráneas presentan los valores más altos de temperatura (T), - Ph y conductividad eléctrica (C.E.). El sistema III está repre- sentado por manantiales cuyas aguas subterráneas presentan los- valores intermedios de Ph, conductividad eléctrica y temperatu- ra, exceptuando el valor alto de temperatura del manantial de - Atotonilco.

Tomando en cuenta el mismo criterio de variabilidad de los rangos de valores de los análisis físico-químicos de las -- aguas subterráneas en los diferentes manantiales de la región - estudiada; y mostradas en la tabla No. VII.2; se observa que:

En el sistema I, tienden a presentarse los valores más bajos en concentraciones de los S.T.D., ALCT, DZAT, Ca^{++} , Na^{+} , -

Mg^{++} , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-

En el sistema II se mantienen los valores más altos en concentraciones de los mismos parámetros físico-químicos mencionados en el sistema I, además de las más altas concentraciones de B, Fe^{++} y F^- .

En el sistema III se presentan los valores intermedios en concentraciones de los S.T.D., ALCT, DZAT, B, Ca^{++} , Fe^{++} , -- K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- .

En conclusión existe una clara relación de la variabilidad de los rangos de valores de los parámetros físicos y físico-químicos de las aguas subterráneas en los tres sistemas establecidos.

Es de hacerse notar que debido a la reciente actividad magmática de la región estudiada, las relativas altas temperaturas de los manantiales de Agua Hedionda, Oaxtepec y Atotonilco, indican una posible actividad termal.

VII.5.2 Familias de Agua

Para obtener una caracterización química a manera rápida y una distribución espacial de los diferentes tipos de agua, se elaboraron los diagramas de Stiff, como se muestran en el plano hidrogeológico anexo, en donde se observa que las aguas subterráneas de los manantiales del sistema I están relacionados hidrogeoquímicamente ya que son del tipo bicarbonatado -magnésica, a excepción de las aguas bicarbonatadas mixtas del manantial de Amecameca.

También existen aguas subterráneas relacionadas hidrogeoquímicamente del tipo sulfatada-cálcica en los manantiales del sistema II.

De la misma manera se presenta una relación hidrogeoquímica en las aguas subterráneas del tipo sulfatada-cálcica en los manantiales del sistema III.

De acuerdo a la aplicación del método Piper y como se observa en la figura No. VII.1, las aguas subterráneas relacionadas hidrogeoquímicamente se agrupan en áreas bien definidas, excepto las aguas subterráneas del manantial de Amecameca.

Una clasificación más precisa de los diferentes tipos de agua de los distintos manantiales estudiados en la región, se presenta en la tabla No. VII.4, dicha clasificación se basó en los diferentes campos de los tipos de agua mostrados en la figura No. VII.2.

VII.6 Posibles Orígenes de los Iones Disueltos en las Aguas Subterráneas de la Región Estudiada.

Es difícil establecer los distintos iones que pueden aportar los diferentes tipos de roca del área estudiada, no solo porque existen importantes diferencias de composición y alterabilidad de los minerales constituyentes si no también porque las condiciones climáticas, composición del agua de recarga, tiempo de contacto, longitud de recorrido, grado de aereación, permeabilidad etc, influyen de forma importante y a veces dominante en la composición química de las aguas subterráneas. Sin embargo en el presente subcapítulo se intenta establecer los posibles orígenes de los diferentes iones disueltos en las aguas-

Otra de las posibles fuentes de origen de sílice es -- productor del ataque a calizas y dolomías de las formaciones -- Cuauila, Morelos y Xochitepec; como producto de la disolución -- de sus minerales secundarios (cuarzo, feldespatos y arcillas) y de su contenido de pedernal.

Posiblemente otro origen de sílice, está relacionado a la probable actividad termal de la región.

Boro (B)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

El boro es ampliamente distribuido en minerales como -- la turmalina de ciertas rocas (granito, pegmatitas y detríti- -- cas). También el boro es un constituyente accesorio de minerales de biotita y anfíboles op. cit. (1). El boro también se encuentra en sales (colemanita, Kernita y bórax) contenidas en de -- pósitos evaporíticos. Otra de las fuentes de origen del boro -- en la naturaleza es debida a emanaciones volcánicas y a manan- -- tiales termales.

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio el boro puede proceder del intem -- perismo de las distintas rocas ígneas, producto de la disolu- -- ción de minerales de biotita y anfíboles. Otro posible origen -- del boro, está asociado a la disolución de sales de boro proba- -- blemente contenidas en los depósitos evaporíticos del Grupo -- Balsas y de la Formación Morelos. Considerando la reciente ac-

tividad volcánica de la región es probable que el boro provenga de gases volcánicos emanados a profundidad; finalmente el boro también puede estar asociado a la posible actividad termal de la región estudiada.

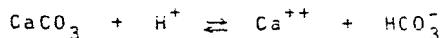
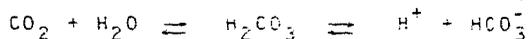
Calcio (Ca^{++})

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

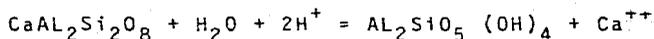
Una de las fuentes más importantes de calcio en la naturaleza se encuentra en minerales de las diferentes rocas sedimentarias carbonatadas y evaporíticas. También el calcio se encuentra en minerales (plagioclasas, anfíboles y piroxenos) de rocas ígneas y metamórficas.

b) Fuentes de Origen en el Área de Estudio

En el área de estudio una de las fuentes de origen del calcio es por medio del intemperismo de terrenos calizos y dolomíticos de las formaciones Cuautla, Morelos y Xochitepec; producto de la disolución de sus principales constituyentes minerales (calcita, aragonito y dolomita), en este caso el calcio se acompaña de carbonatos, bicarbonatos y a menudo de magnesio en mayor o menor proporción. Probablemente otra fuente de calcio es por medio de la disolución del cementante calcáreo de los conglomerados calizos del Grupo Balsas y de las lutitas calcáreas de la formación Mexcala; como ejemplo de reacción química se presentan los diferentes pasos para llevar a cabo la disolución de la calcita en este tipo de terrenos.



Otro origen del calcio es producto de la disolución de depósitos yesíferos del Grupo Balsas y anhidríticos de la Formación Morelos, en lo cual el calcio se suele acompañar de grandes concentraciones de sulfatos. La disolución de minerales -- (feldespatos cálcicos, anfíboles y piroxenos) constituyentes de las diferentes rocas ígneas de la región, por ejemplo las rocas basálticas y andesíticas de las formaciones Zempoala e Iztaccíhuatl y del Grupo Chichinautzin, representa otra fuente de origen del calcio; como ejemplo en este tipo de rocas se presenta la disolución de la anortita.



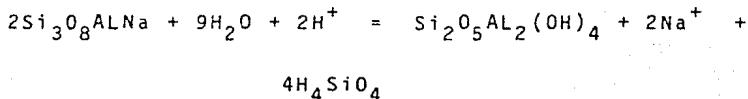
Sodio (Na^+)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

Una de las fuentes de origen del sodio en la naturaleza lo constituyen los minerales de feldespatos sódicos y otros silicatos. El sodio también se encuentra en sales de depósitos evaporíticos. Los efectos de adsorción de las arcillas y sus propiedades de cambio de bases representan otro origen del sodio. También las aguas subterráneas de tipo termal tienden a enriquecerse en iones sodio op. cit. (2).

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio el sodio proviene de la disolución de minerales de feldespatos sódicos y otros silicatos de rocas ígneas preferentemente de composición ácida e intermedia, por ejemplo de las riodacitas Popocatepeti; como ejemplo de reacción química se muestra la disolución del feldespato sódico -- (albita-oligoclasa).



También el sodio proviene de la disolución de sales de sodio probablemente contenidas en los depósitos evaporíticos -- del Grupo Balsas y de la Formación Morelos, en el cual el sodio suele acompañarse de grandes cantidades de cloro. Otra de las probables fuentes de origen del sodio en el área de estudio, es tá asociada a la posible actividad termal de la región.

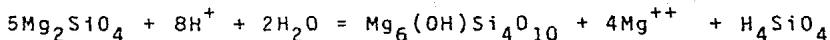
Magnesio (Mg^{++})

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

Los orígenes del magnesio en la naturaleza proceden de rocas ricas en magnesio (basaltos olivínicos, dolomías etc), y de sales de magnesio contenidas en depósitos evaporíticos op. - cit. (1).

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio una de las fuentes de origen del magnesio es consecuencia de la disolución de minerales de dolomita de las dolomías y calizas-dolomíticas de la Formación Morelos; en este caso el magnesio suele asociarse con calcio y bicarbonatos. Otra fuente de origen del magnesio en la zona de estudio proviene de la disolución de minerales ferromagnesianos ricos en magnesio (olivinos) de rocas de composición básica e intermedia, por ejemplo de basaltos y andesitas de la Formación Iztaccíhuatl, Andesita Zempoala y del Grupo Chichinautzín; como ejemplo de reacción se presenta la disolución del olivino (forsterita) presente en este tipo de rocas.



Forsterita

Antigorita

Otra de las posibles fuentes de magnesio, es mediante la disolución de sales de magnesio probablemente contenidas en los depósitos evaporíticos del Grupo Balsas y de la Formación Morelos.

Fierro (Fe^{++})

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

Entre los minerales y grupos mineralógicos más impor--

tantes que pueden contener grandes cantidades de hierro son: - magnetita, pirita, biotita, anfíboles, piroxenos, siderita, - - etc, la descomposición de estos minerales por la acción de ajentes meteóricos deja en libertad grandes cantidades de hierro. - También las aguas subterráneas termales tienden a enriquecerse en iones de fierro op. cit. (2).

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

El hierro en el área de estudio proviene de rocas - - ígneas producto de la disolución de minerales ya mencionados. - Otra fuente de origen es por disolución de minerales carbonatados ricos en hierro (siderita) probablemente existe en calizas de las formaciones Cuatla, Morelos y Xochicalco. También los contenidos de hierro pueden estar relacionados a la probable actividad termal de la zona de estudio.

Potasio (K^+)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

El potasio en la naturaleza se encuentra en minerales silicatados (feldespatos, biotitas, etc). También se encuentra distribuido en ciertas sales evaporíticas. Las aguas subterráneas de tipo termal presentan la característica de enriquecerse en este ion, siempre y cuando se cuente con la disponibilidad del potasio.

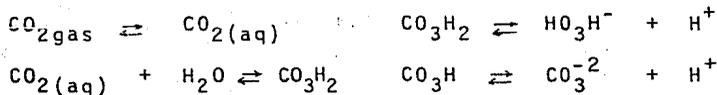
b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio el potasio puede provenir de rocas ígneas de composición principalmente ácida por ejemplo las riolacitas Popocatepetl; producto de la disolución de sus minerales (feldespatos potásicos y micas). Otra de las posibles -- fuentes de origen del potasio es debido a la disolución de sales potasio probablemente contenidas en los depósitos evaporíticos del Grupo Balsas y de la Formación Morelos. Posiblemente - el potasio también está asociado a la probable actividad termal de la región.

Carbonatos (CO_3^{-2}) y Bicarbonatos (HCO_3^-)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

Uno de los principales orígenes de estos iones en la naturaleza, está relacionada a procesos de disolución o hidrólisis de minerales carbonatados y silicatados (op. cit. (2)), en cuyos casos se acompañan de iones calcio. También sus orígenes son asociados a fenómenos de disociación del anhídrido carbónico existente en las aguas subterráneas, como se ilustra a continuación.



También ciertas aguas subterráneas termales tienden a enriquecerse en bicarbonatos op. cit. (2).

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

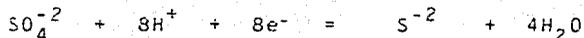
Una de las fuentes de origen de estos iones en la zona de estudio es por medio de disolución de minerales carbonatados (calcita, aragonito, dolomita, etc.), contenidos en calizas y calizas dolomíticas de las formaciones Morelos, Cuautla y Xochicalco. También la disolución del cementante calcáreo de los conglomerados calizos del Grupo Balsas y de las lutitas calcáreas de la Formación Mexcala, constituye otra fuente de origen. Posiblemente la hidrólisis de minerales silicatados de rocas ígneas por ejemplo andesitas, escorias basálticas y basaltos -- del Grupo Chichinautzin, represente otro origen. Es probable que otro origen de estos iones es debido a la disociación del CO_2 existente en las aguas subterráneas. Finalmente otra fuente de origen de los iones bicarbonatados puede estar relacionada a la posible actividad termal de la región.

Sulfato (SO_4^{-2}) y Azufre (S^{-2})

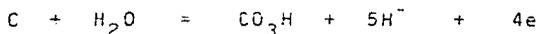
a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

Una de las fuentes de origen de sulfatos (SO_4^{-2}) en la naturaleza es producto de la disolución de depósitos evaporíticos (yesos, anhidritas, etc.). También el sulfato proviene de la oxidación de sulfuros (pirita). Las emanaciones volcánicas también aportan iones sulfato en grandes cantidades. La reduc-

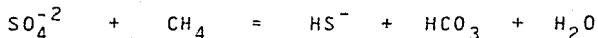
ción de sulfato con abundante materia orgánica provoca azufre - (S^{-2}), cuya reacción simplificada es:



Los aportes de hidrogeniones y electrónes está dado -- por la reacción del carbono orgánico y el agua, en donde se producen cantidades significativas de bicarbonatos.



Según Hem (1970) los procesos de reducción de sulfatos en estas mismas condiciones se pueden representar con la siguiente reacción.



b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio los iones sulfato provienen de la disolución de yesos del Grupo Balsas y de las anhidritas de la Formación Morelos. Considerando la reciente actividad volcánica de la región es probable que el sulfato provenga de emanaciones volcánicas a profundidad.

Es probable que las cantidades de azufre (S^{-2}) reflejen una reducción bacteriana de sulfatos, reducción de sulfatos por cambio de las condiciones físico-químicas de las aguas sub-

terráneas en superficie o directamente un aporte volcánico por emanaciones a profundidad.

Cloro (Cl^-)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

La mayor parte del cloro que se encuentra en las aguas subterráneas suele proceder del agua marina de sedimentación -- atrapada en el interior de los sedimentos; de la disolución de sal común y de minerales a fines que existen en formaciones evaporíticas. Kuroda y Sandell (1953) en op. cit. (1) mencionan que el cloro puede reemplazar hidróxidos en biotitas y hornblendas y que puede estar en solución en vidrios volcánicos (obsidiana). Otra fuente de aporte de cloro proviene de manantiales termales y de emanaciones volcánicas.

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

Una de las fuentes de origen del cloro en la zona de estudio es producto del agua marina probablemente atrapada en las secuencias marinas y sedimentarias de la región. Probablemente también provenga de la disolución de sales de cloro existentes en los depósitos evaporíticos del Grupo Balsas y Formación Morelos; de la disolución de biotitas y hornblendas de las rocas ígneas de la región. Finalmente el cloro también puede estar asociado a la posible actividad termal registrada en la zona de estudio.

Fluor (F^-)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

La fluorita es el mineral más común de fluor en la naturaleza y se presenta tanto en rocas ígneas como en sedimentarias; el apatito y la hornblenda también contienen fluor, la flogopita contiene pequeñas cantidades de fluor y suele presentarse en calizas y dolomías. Otra de las fuentes de fluor en la naturaleza proviene de gases volcánicos y fumarólicos.

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio es probable que el fluor provenga del interperismo de rocas ígneas, producto de la disolución de minerales como la fluorita, apatito y hornblenda. También el fluor puede proceder de la disolución de micas (flogopita) - posiblemente existentes en calizas y dolomías de las formaciones calcáreas. Considerando la relativa reciente actividad volcánica de la región es probable que el fluor también provenga de gases volcánicos emanados a profundidad.

Nitrato (NO_3^-)

a) Fuentes de Origen en la Naturaleza

Dentro de los orígenes del nitrato (NO_3^-) en la natura

leza se pueden citar a los procesos de nitrificación, descomposición de materia orgánica, fertilización y contaminación urbana e industrial.

b) Fuentes de Origen en el Area de Estudio

En el área de estudio los posibles orígenes y principales del nitrato, están asociados a procesos de fertilización y a contaminación urbana e industrial.

VII.7 Implicaciones Hidrogeológicas

De acuerdo al comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de los diferentes manantiales en la región, se presentan a continuación las siguientes observaciones:

Considerando la relación que existe entre la composición litológica de los acuíferos de los manantiales del sistema I (véase tablas No. VI.4 y VII.3) y la facie hidrogeoquímica (véase tabla No. VII.4) de sus aguas subterráneas, los bajos valores de los distintos parámetros físico-químicos (véase tabla No. VII.1 y VII.2) que tienden a presentarse en estos manantiales y la distribución de estos manantiales, se define que estas aguas subterráneas son de reciente infiltración, infiltración llevada a cabo principalmente en las Sierras de Chichinautzin, Nevada y Zempoala. También la persistencia de mantenerse los bajos valores en especial de S.T.D., Mg^{++} , Ca^{++} y HCO_3^- , en las aguas subterráneas de este mismo sistema, nos puede dar indicación de la alta permeabilidad principalmente por fisuración de las rocas volcánicas del Grupo Chichinautzin, por lo que involu

cra a la vez altas velocidades de flujo subterráneo en estas rocas y consecuentemente poco tiempo de contacto entre estas y el agua.

Por otro lado la falta de relación entre la composición litológica del acuífero de los manantiales del sistema II con la facies hidrogeoquímica de sus aguas subterráneas, las temperaturas relativamente altas y los altos contenidos de sales disueltas; denotan un flujo subterráneo de estratos profundos de baja porosidad y permeabilidad, lo que implicaría a la vez bajas velocidades de flujo en estos medios, tiempos de contacto prolongado entre el agua subterránea y la litología involucrada.

Debido a la caracterización química y al conocimiento de la composición litológica de la región, se ha interpretado que probablemente este flujo subterráneo ha circulado sobre conglomerados calizos del Grupo Balsas, tal como lo demuestran los altos contenidos de HCO_3^- y Ca^{++} , y sobre depósitos yesíferos del mismo grupo, tal como se comprueba con los altos concentraciones de SO_4^{2-} y Ca^{++} . Pero considerando la reciente actividad volcánica de la región, las relativas altas temperaturas de estas aguas subterráneas y sus concentraciones más altas de B , Na^+ , K^+ , Fe^{++} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , es probable que estas mismas aguas subterráneas estén influenciadas por actividad magnética.

Se ha considerado que la alta permeabilidad de las unidades acuíferas carbonatadas de las formaciones Cuautla y Morelos es principalmente por fracturación y por disolución, lo que implica que en este tipo de acuíferos se deben tener altas velocidades de flujo, con poco tiempo de contacto entre el agua subterránea y la litología del acuífero, consecuentemente las aguas subterráneas en este tipo de acuíferos deben contener bajas concentraciones de sales disueltas y una predominación del-

contenido de iones HCO_3^- , Ca^{++} y Mg^{++} en menor o mayor proporción dependiendo del grado de dolomitización de la unidad acuífera. Sin embargo existe una mezcla de aguas subterráneas en estas unidades acuíferas, manifestada en los manantiales del sistema III (véase tabla No. VII.3). Esta mezcla se ha definido por la falta de relación entre la composición litológica de estos acuíferos carbonatados con la facies hidrogeoquímica de sus aguas subterráneas (véase tablas No. VI.4 y VII.4), a la predominancia del contenido de sulfatos, a las altas concentraciones de calcio y bicarbonatos, y a los contenidos relativamente altos de magnesio (véase tabla No. VII.2). Conociendo la composición litológica y el comportamiento hidrogeológico de las diferentes formaciones geológicas, dicha mezcla se ha interpretado como producto de aguas subterráneas que probablemente han circulado en conglomerados calizos del Grupo Balsas, tal como lo indican las altas concentraciones de Ca^{++} y HCO_3^- , lo que implicaría a la vez que no solamente el acuífero basáltico del Grupo Chichinautzin recarga a estos acuíferos carbonatados, sino también estos conglomerados, que aunque se comportan como un acuífero, regionalmente pueden recargar en forma subterránea a los acuíferos de las formaciones Cuautla y Morelos.

Las altas concentraciones de SO_4^- y Ca^{++} en este mismo sistema se han interpretado como producto de disolución de anhidritas de la Formación Morelos y posiblemente de la disolución de yesos del Grupo Balsas. Por otra parte los contenidos relativamente altos de Mg^{++} en estas aguas subterráneas, indican un aporte de un flujo subterráneo que ha circulado en rocas basálticas del Grupo Chichinautzin o una disolución de dolomías de la Formación Morelos.

TABLA No. VII.1
 MEDICIONES FISICAS DE CAMPO

NO. MUESTRA	TIPO DE APROVECHAMIENTO	NOMBRE	T °C	C.E. μ mhos/cm	Ph
1	Manantial	Amecameca	6.0	115	6.0
2	Manantial	Oaxtepec	26.4	3180	7.4
3	Manantial	Cocoyoc	18.8	172	6.4
4	Manantial	Chapultepec	17.2	86	6.2
5	Manantial	Las Tazas	18.1	290	6.4
6	Manantial	El Almeal	18.7	292	6.8
7	Manantial	Agua Hedionda	26.3	3000	7.2
8	Manantial	Las Estacas	23.1	1250	7.1
9	Manantial	Palo Bolero	22.5	2100	7.0
10	Manantial	Atotonilco	32.5	1890	7.1
11	Laguna	Tequesquitengo	30	3430	6.6
12	Laguna	Zempoala	13.7	123	5.9

TABLA No. VII.2
 RESULTADOS DE LOS ANALISIS FISICO-QUIMICOS DE LABORATORIO

NO. MUESTRA	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	Ph	STD mg/l	ALCT mg/l CaCO_3	DZAT mg/l CaCO_3	SiO_2 mg/l	B mg/l	Ca^{++} mg/l	Na^+ mg/l	Mg^{++} mg/l	Fe^{++} mg/l	K^+ mg/l	CO_3^{-2} mg/l	HCO_3^- mg/l	SO_4^{-2} mg/l	Cl^- mg/l	F^- mg/l	NO_3^- mg/l	S^{-2} mg/l
1	195	7.5	203	98	76	-	0.20	16	7	9	1.4	8	0	60	41	4.3	0.15	3.5	-
2	3130	6.5	2927	1421	1910	68	1.6	540	75	134	1.6	28	0	867	1085	12.8	1.6	2.2	0.58
3	210	6.0	202	196	84	83	0.04	10	12	14	0.5	7	0	120	0	4.8	0.33	7	-
4	105	7.2	198	88	54	47	0.04	6	8	9	0.4	5	0	54	1.9	5.8	0.96	6.9	-
5	347	6.2	250	323	142	81	0.15	15	17	25	0.6	9	0	197	2.2	7.2	0.37	9.7	-
6	345	6.3	362	319	146	77	0.02	14	18	26	0.6	9	0	194	2.4	6.7	0.39	9.5	-
7	2910	6.6	2607	1308	1800	68	0.86	488	99	139	1.4	26	0	798	1110	91	1.5	2.2	0.80
8	1199	7.2	955	539	645	68	0.3	160	29	59	0.8	13	0	327	377	20	0.7	8.1	-
9	2220	7.2	2033	609	1099	44	0.19	333	21	64	0.8	11	0	421	720	21	0.28	2.1	0.84
10	1609	7.2	1378	463	766	60	0.16	207	54	60	0.6	11	0	283	505	25	1	5.7	-
11	3230	7.5	3226	380	1738	109	0.21	288	109	242	0.6	44	68	168	1880	55	0.56	2.4	-

TABLA No. VII.3
 SISTEMA DE MANANTIALES

SISTEMA	T (°C)	Ph	(µmhos/cm)	NOMBRE DEL MANANTIAL
I	6 a 18.7	6 a 6.8	86 a 292	Amecameca, Cocoyoc, Chapultepec Las Tazas y El Almeal
II	23.3 a 26.4	7.1 y 7.4	3000 a 3180	Oaxtepec y Agua Hedionda
III	22.5 a 32.5	7.0 a 7.1	1250 a 2100	Las Estacas, Palo Bolero y Atotonilco

TABLA No. VII.4
 CLASIFICACION QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS
 (FACIES HIDROGEOQUIMICA)

No. MUESTRA	FACIES HIDROGEOQUIMICA		
1	Bicarbonatada	-	Cálcica y magnésica
2	Sulfatada	-	Cálcica
3	Bicarbonatada	-	Magnésica y Sódica
4	Bicarbonatada	-	Magnésica y Sódica
5	Bicarbonatada	-	Magnésica
6	Bicarbonatada	-	Magnésica
7	Sulfatada	-	Cálcica
8	Sulfatada	-	Cálcica
9	Sulfatada	-	Cálcica
10	Sulfatada	-	Cálcica
11	Sulfatada	-	Magnésica y Cálcica

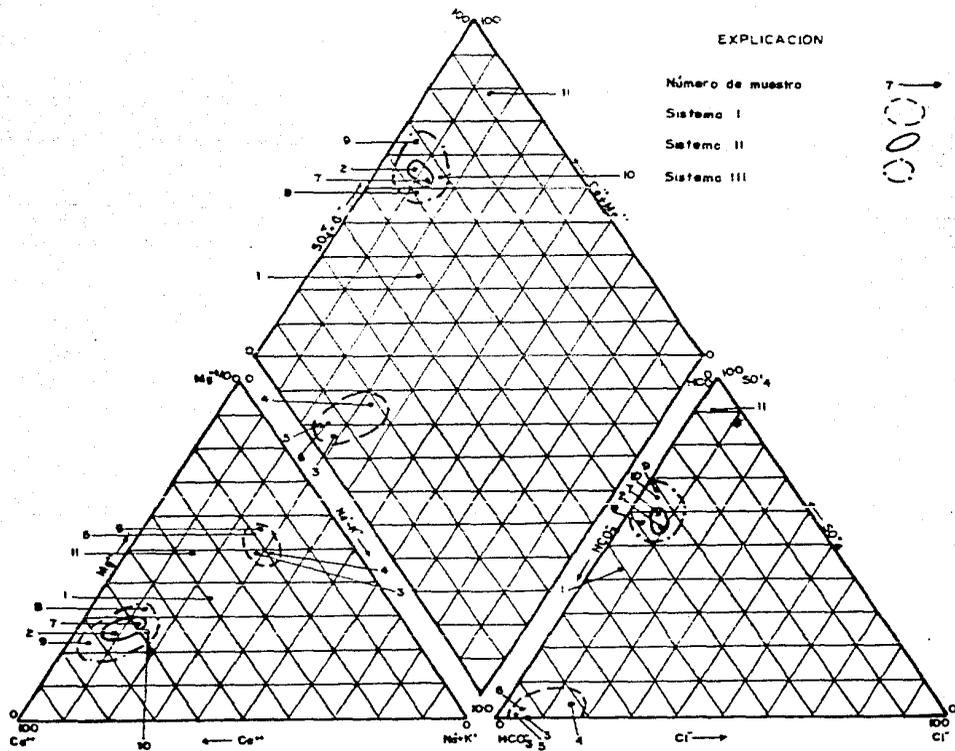


Figura VII.1 Clasificación y Agrupación de los diferentes Tipos de Agua Subterráneo en Diagrama de Piper.

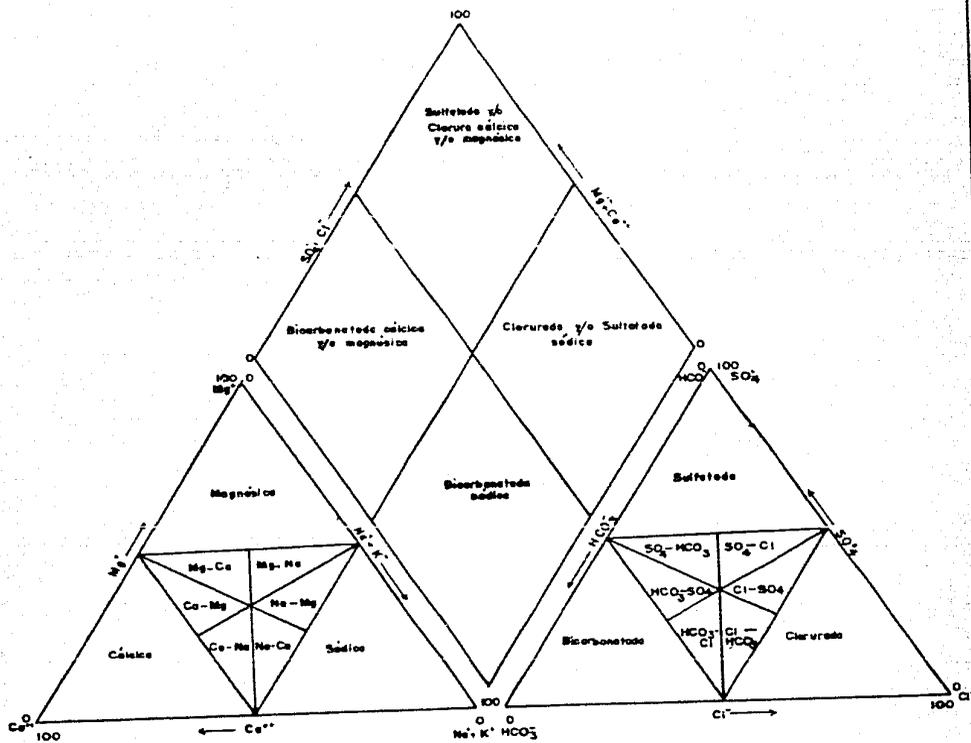


Figura VII.2 Tipos de agua según Piper (Tomado de Custodio y LLamas 1976)

BIBLIOGRAFIA

- Campa Uranga F. 1978.
La Evolución Tectónica de Tierra Caliente Estado de Guerrero
Bol. Soc. Geológica Mixicana Tomo xxxix No. 2
- Custodio. E y Llamas M.R. 1976
Hidrología Subterránea
Edic. Omega S.A
- Davis S.N. y De Wiest R. 1971
Hidrogeología
Edic. Ariel . Barcelona
- Demant A. 1978
Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus - -
Problemas de Interpretación
Rev. del Instituto de Geología UNAM Vol. 2 No. 2
- 1982
Interpretación Geodinámica del Volcanismo del Eje Neovolcáni
co Transmexicano
Rev. del Instituto de Geología UNAM Vol. 5 No. 2
- Freeze R.A.Y. and Cherry J.A 1979
Groundwater
New Jersey Prentice-Hall
- Fries C. Jr. 1960
Geología del Estado de Morelos y de las Partes Adyacentes --
del Estado de México y Guerrero. Región Centro - Meridional-
de México
Bol. No. 60 del Instituto de Geología UNAM.

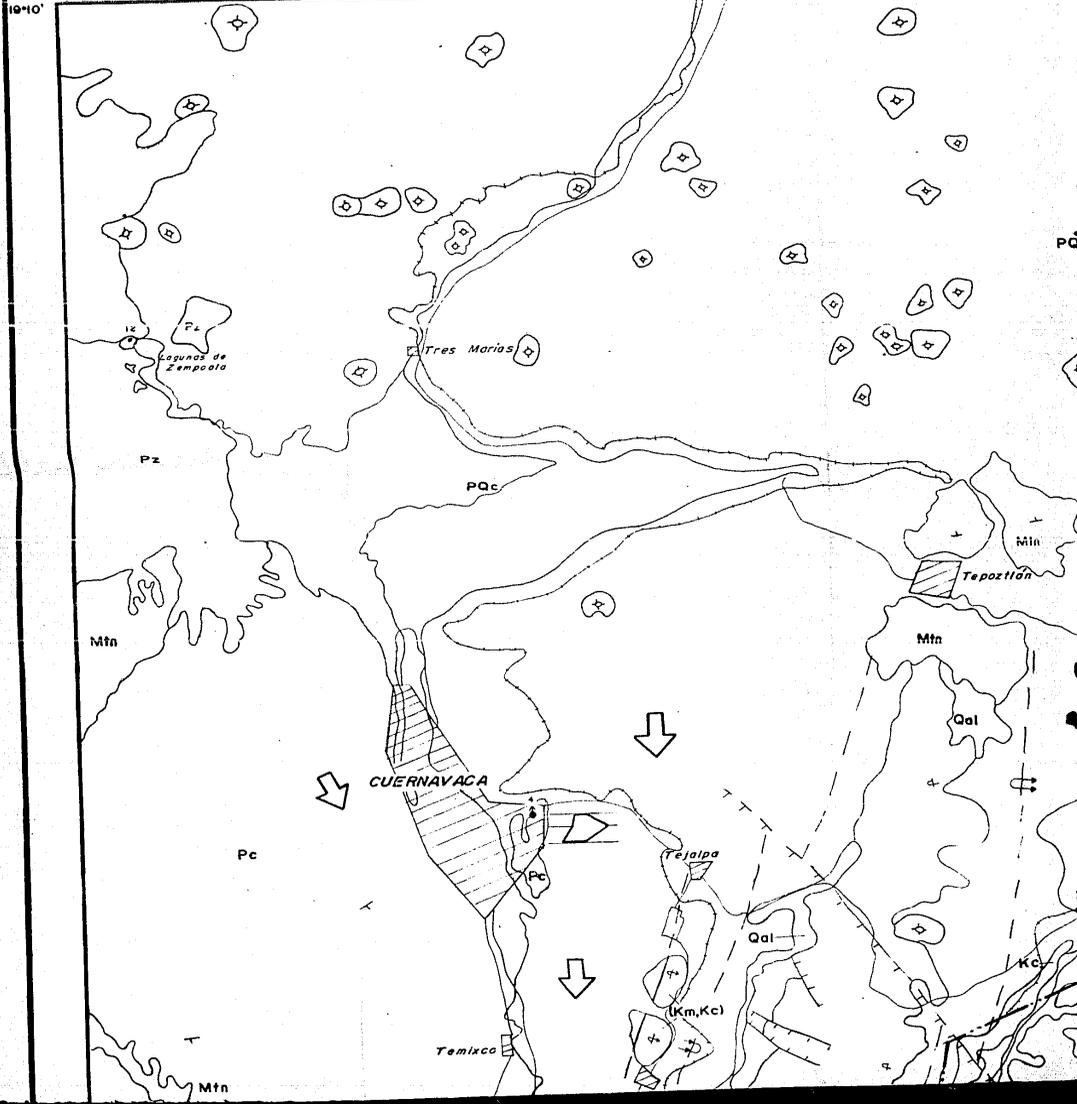
- Fries C. Jr. y De Cserna E. 1964
Carta Geológica del Estado de Morelos, Hoja Cuernavaca
clave 14Q-h(S) escala 1:100000, Instituto de Geología
UNAM, mapa con resumen.
- Hem J.F. 1970
Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of
Natural Water
Geological Survey Water - Supply Paper 1473
- Hubp L. 1984
Geomorfología del Sur de la Cuenca de México
Instituto de Geografía UNAM
- INEGI 1983 a
Carta Hidrológica de Aguas Superficiales
Hoja Cuernavaca clave E14-5 escala 1:250000
- INEGI 1983 b
Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas
Hoja México clave E14-2 escala 1:250000
- Lesser J.H. 1961
Determinación del Coeficiente Relativo de Infiltración para-
la Vertiente Sur de la Sierra de Chichinautzin
Oficina de Estudios Especiales SRH, Méx. D.F.
- Martín del Pozzo A.L. 1980
Volcanología de la Sierra Chichinautzin
Tesis de Maestría Fac. Ciencias UNAM

- 1982
Monogenetic Volcanism in Sierra Chichinautzin México
Bull. Volcanol, Vol 45-1
- Mooser F. 1975
Historia Geológica de la Cuenca de México
Memorias de las obras del Sistema del Drenaje Profundo del -
D.F. Tomo I
- Morán D.J. 1984
Geología de la República Mexicana
Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
- Ortega G.A. 1981
Modelo de Funcionamiento Hidrogeológico del Valle de Ameca--
meca Edo. Méx.
Tesis de Licenciatura Fac. Ingeniería UNAM.
- SARH 1980 a
Boletín anual del Servicio Meteorológico Mexicano
- SARH 1980 b
Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Cuernavaca
en el Estado de Morelos. Realizado por la Cfa. TACSA
- SARH 1981
Estudio Geohidrológico Preliminar de la zona de Cuautla-
Yautepec, Estado de Morelos. Realizado por la Cfa. ROASA
- Thauvin J.P. 1982,
Hidrogeología Básica
XV Curso de Hidrogeología Aplicada. Madrid España

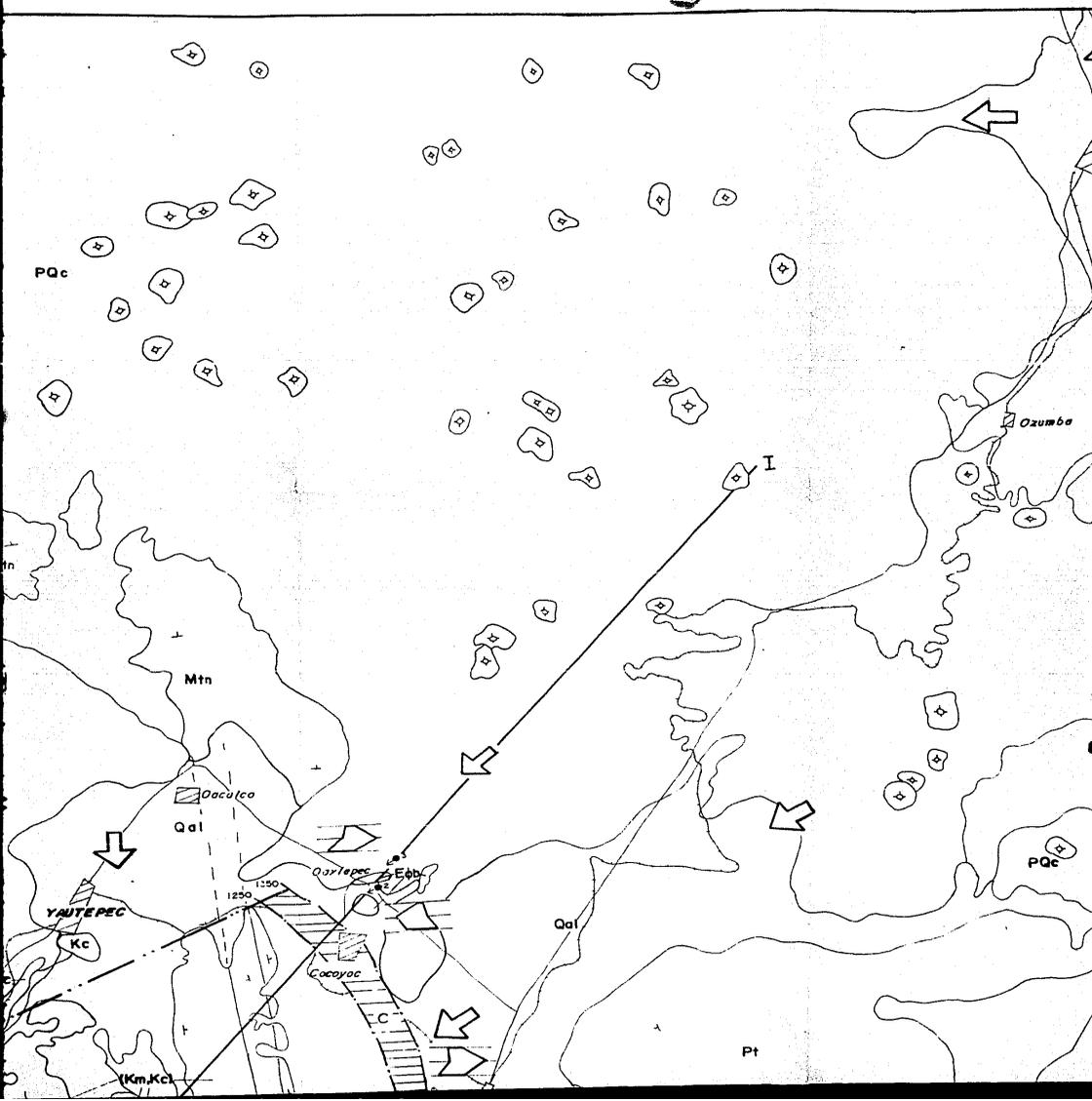
CONTINUA

09°20'00"

19°10'



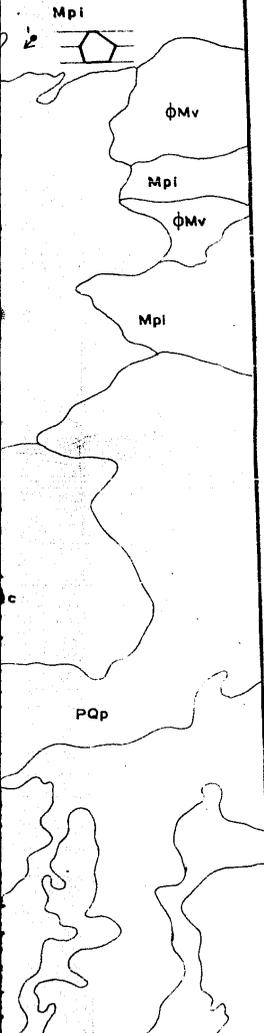
CONTINUA



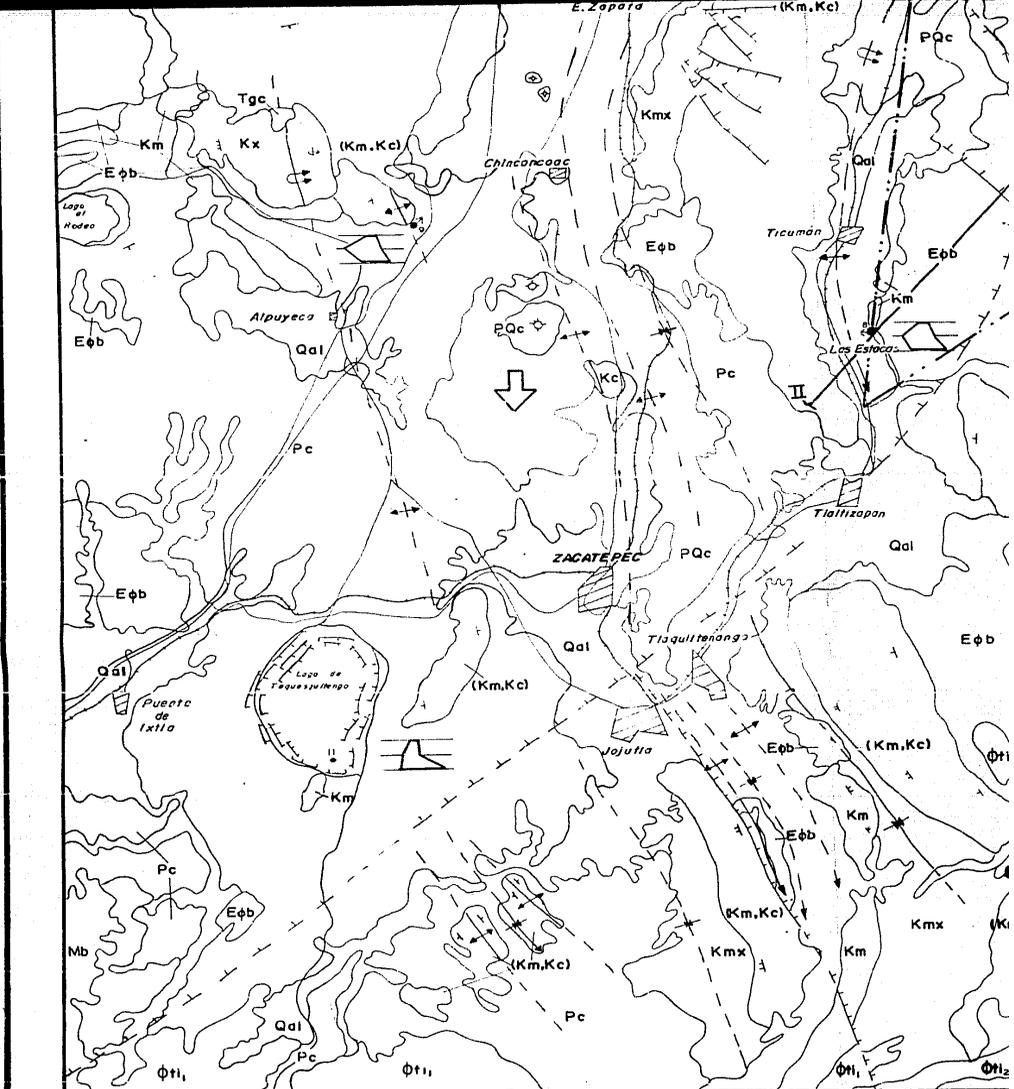
98°40'00" 19°00'00"

EXPLICACION

SECUENCIA HIDROGEOLOGICA

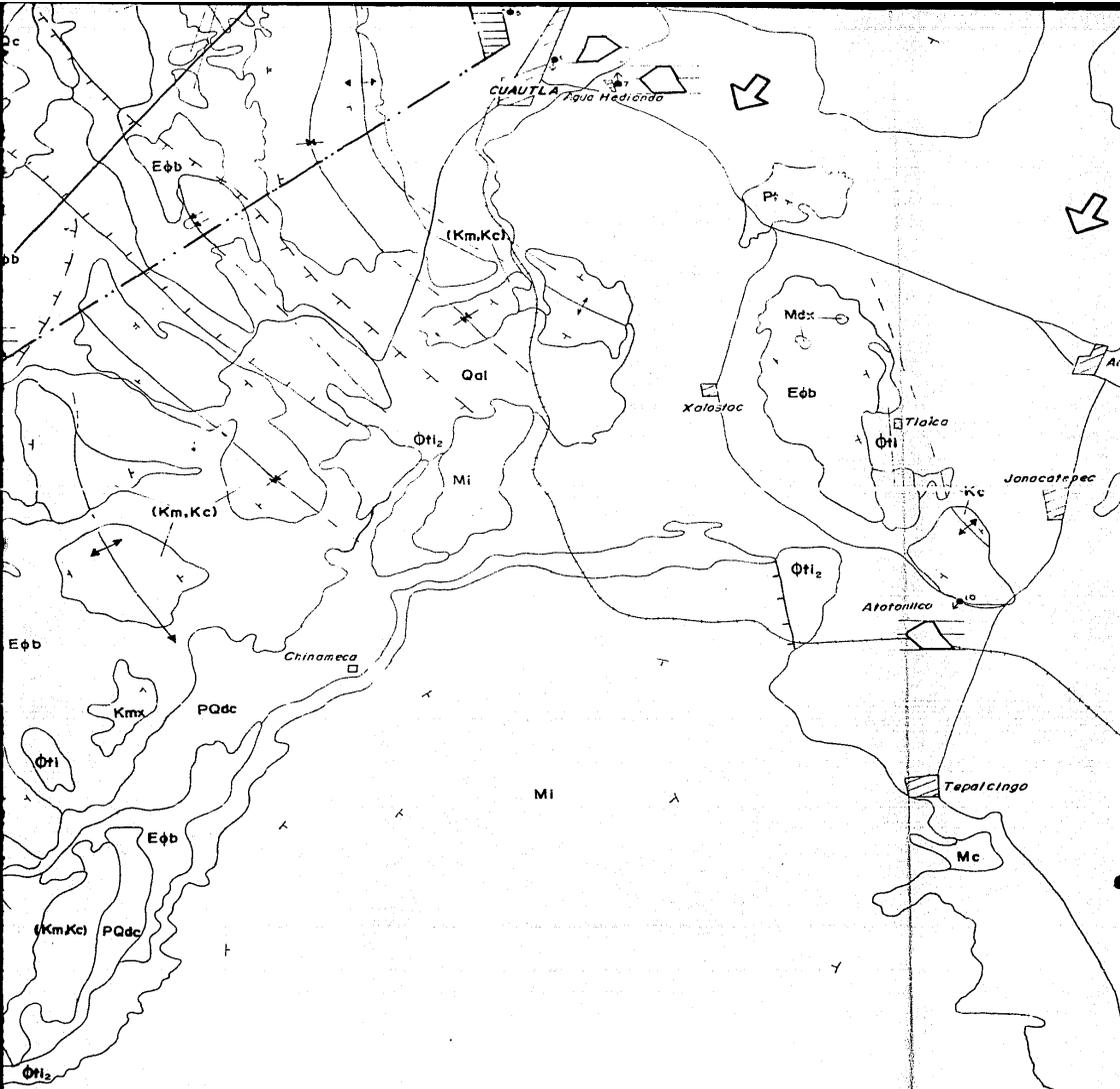


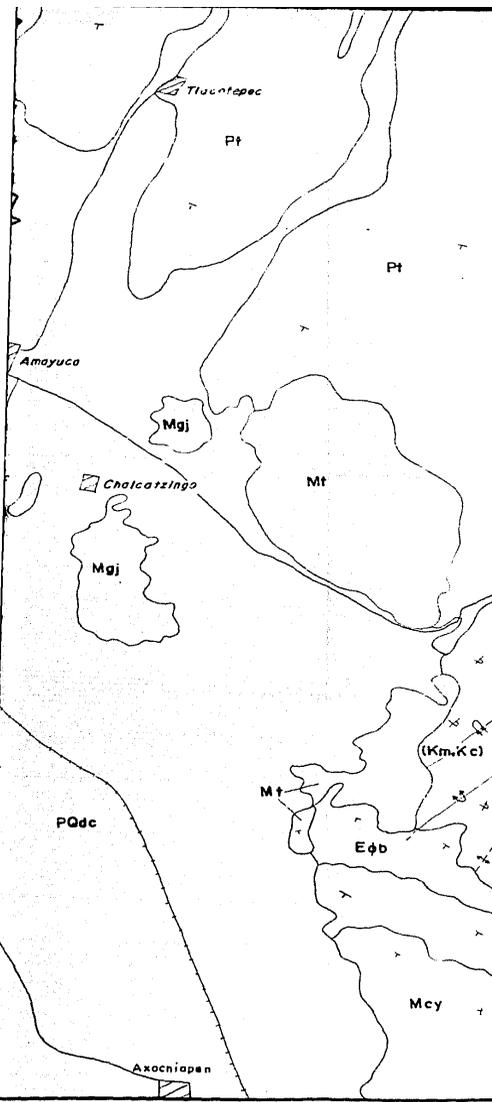
Platense y Superior	<table border="1"><tr><td>Qal</td><td>Qp</td></tr></table>	Qal	Qp	<table border="1"><tr><td>PQc</td><td>PQp</td><td>PQdc</td><td>Pt</td></tr></table>	PQc	PQp	PQdc	Pt
	Qal	Qp						
PQc	PQp	PQdc	Pt					
Qal. ALUVION: gravas y arenas no consolidadas y de * partes locales de traver fino, margo y cenizo vol- c6nico ACUIFERO	Qp. DEPOSITOS PIROCLASTICOS pirocl6stos o no con solidados, desde cenizo hasta lapilli ACUIFERO	PQc. DEPOSITOS CLASTICOS, CONTINENTALES; gra- vas y arenas no consolidados ACUIFERO	PQp. GRUPO CHICHINAUTZIN basaltos vesiculares y an- desitas fracturados y escorias ACUIFERO	PQdc. RIODACITA POPOCATEPETL dacitos y riodacitos fracturados (alta permeabilidad)	Pt. FORMACION TLAYEAC: lahares granosos con ba- solos y andesitas fracturadas ACUIFERO			
Pleistoceno	<table border="1"><tr><td>Pc</td></tr></table>	Pc	<table border="1"><tr><td>Mdi</td><td>Mdp</td></tr></table>	Mdi	Mdp			
	Pc							
Mdi	Mdp							
Pc. FORMACION CUERNAVACA: secuencia de conglome- rados y arenas poco consolidadas ACUIFERO	Mdi. FORMACION IZTACCHUATL dacitos, andesitas y riodacitos, compactos y fracturados (permeables)	Mdp. ANDESITA ZEMPOLA: intercalaci6n de ande- sitas fracturadas y silíceas (permeables) con pirocl6- stos y lahares arcillosos (baja permeabilidad)						
Holoceno	<table border="1"><tr><td>Mb</td><td>Mi</td><td>Mt</td></tr></table>	Mb	Mi	Mt	<table border="1"><tr><td>Mv</td><td>Mn</td></tr></table>	Mv	Mn	
	Mb	Mi	Mt					
Mv	Mn							
Mb. GRUPO BUENAVISTA: principalmente andesitas compactas con escaso fracturamiento (baja per- meabilidad)	Mi. GRUPO IXTLILCO: andesitas fracturadas y piro- clastos (permeabilidad media)	Mt. GRUPO TEPEXCO: riodacitos compactos y con- solidados (permeabilidad baja)	Mv. ROCAS VOLCANICAS DEL TERCARIO MEDIO: dacitos con fracturamiento cerrado, brechas y tallas arcillosas ACUITARDO	Mn. FORMACION TEPOZTLAN: lahares y tobas andesiticas, y arcillosas ACUITARDO				
Cuaternario	<table border="1"><tr><td>Qti1</td><td>Qti2</td></tr></table>	Qti1	Qti2	<table border="1"><tr><td>Eob</td></tr></table>	Eob			
	Qti1	Qti2						
Eob								
Qti1. RIOLITA TILZAPOTLA: ignimbritas solidadas y riolita poco fracturadas (permeabilidad baja)	Qti2. FORMACION TLAIACA: riolitas poco fracturadas e ignimbritas compactas (baja permeabilidad)	Eob. GRUPO BALSAS: arcillas, limas, conglomeraos calizos bien cementados y arcillosos. ACUITARDO, calizas y yesos lacustres, (permeabilidad baja)						
Episodios	<table border="1"><tr><td>Kmx</td></tr></table>	Kmx	<table border="1"><tr><td>Kc</td></tr></table>	Kc				
	Kmx							
Kc								
Kmx. FORMACION MEXCALA: areniscas de grano fino, limolitas compactas y lutitas. ACUITARDO.	Kc. FORMACION CUAUTLA: calizas de banco cascadas, compactas, fracturadas y con desarrollo c6stico ACUIFERO, en menor proporci6n calizas clasticas arcillosas intercaladas con lutitas (baja permeabilidad)							
Cenozoico inferior	<table border="1"><tr><td>Km</td></tr></table>	Km	<table border="1"><tr><td>Kx</td></tr></table>	Kx				
	Km							
Kx								
Km. FORMACION MORELOS: interestratificaci6n de calizas y dolomias compactas, fracturadas y con desarrollo c6- stico ACUIFERO. la base esta constituida por anhidritas cuya permeabilidad esta sujeta a emulsi6n.	Kx. FORMACION XOCHICALCO: interestratificaci6n de lutitas y calizas arcillosas, compactas, con abundancia de pe- sados ACUITARDO.							
Mioceno	<table border="1"><tr><td>Mgj</td><td>Mdx</td></tr></table>	Mgj	Mdx	<table border="1"><tr><td>Tgc</td></tr></table>	Tgc			
	Mgj	Mdx						
Tgc								
Mgj. GRANODIORITA JANTETELCO: compacta, alterada y con fracturamiento cerrado. ACUITARDO	Mdx. DIORITA XALOSTOC: permeabilidad en funci6n del fracturamiento y alteraci6n.	Tgc. GRANITO COLOTEPEC: se infiere de baja permeabilidad						
Preterciario	ROCAS INTRUSIVAS							



18°30'
99°20'00"

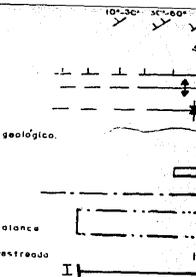






98°40'00" 18°30'00"

- Rumbo y echado de las capas
- Bomba y achado de capas invertidas
- Fuente normal con tres puntas donde está sepultado
- Anticlinal bastante con línea puntada donde está sepultado
- Anticlinal recumbente
- Sinclinal recumbente
- Cono Clástico
- Dirección de flujo del agua subterránea
- Curvas de igual carga hidráulica
- Celda de balance
- Manantial Muestreado
- Sección Hidrogeológica

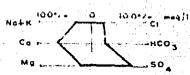


Unidades Hidrogeológicas

- Acuíferos en medio granular (Pc, Qp, PQdc, Pt)
- Acuífero en medio fracturado (PQc, PQp, Mpi, Pz)
- Acuífero en medio carbonatado (Km, Kc)

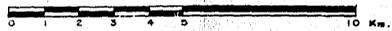
Acuíferos (Mc, Mcc, Mcy, Mb, Mi, Mt, Mtn, Omv, Ot1, Ot2, Eφb, Km, Kx, Mgj, Mdx, Tgc)

Diagrama de Stiff modificado



Ciudad o población
 Carretera
 F.F.C.C.

ESCALA: 1:100000



Nota La elaboración de este plano se basó en la geología modificada y simplificada de los trabajos de Friesio Schloepfer (1968) y Ortega (1961), así como en los estudios de SARH (1980 y 1981)

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	TESIS PROFESIONAL	
PLANO HIDROGEOLOGICO		
Eliseo Vázquez Sánchez.		1987



Rumbo y echado de las capas

Rumbo y echado de capas invertidas

Falla normal con líneas punteadas donde está sepultada

Anticlinal buzante con líneas punteadas donde está sepultada

Anticlinal recumbente

Sinclinal recumbente

Cono Cuaternario

Dirección de flujo del agua subterránea

Curvas de igual carga hidráulica

Celda de balance

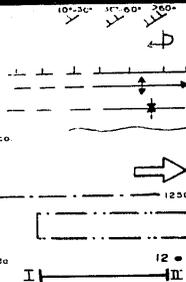
Manantial Muestreado
Sección Hidrogeológica

Sinclinal

Contacto geológico

Área de balance

Laguna Muestreada



Unidades Hidrogeológicas

Acuíferos en medio granular (Pc, Qp, PQdc, P1)

Acuífero en medio fracturado (PQc, POp, Mpi, Pz)

Acuífero en medio carbonatado (Km, Kc)

Acuíferos (Mc, Mcc, Mcy, Mb, Mi, Mt, Mn, Omv, Ot1, Ot2, Efb)

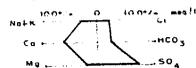
Kmx, Kx, Mj, Mdx, Tgc)

Diagrama de Stiff modificado

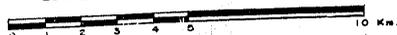
Ciudad o población

Carretera

F.F.C.C.



ESCALA: 1:100000



Nota: La elaboración de este plano se basó en la geología modificada y simplificada de los trabajos de Fries (1960 y 1964), Schlaepfer (1961) y Ortíz (1961), así como en los estudios de SARH (1960 y 1961).

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	TESIS PROFESIONAL	
PLANO HIDROGEOLOGICO		
Eliseo Vázquez Sánchez.		1987

98°40'00"

18°30'00"

