



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“Niveles de fluoruro en el agua subterránea y condiciones de fluorosis en la
región Tenextepango-Tepalcingo, Morelos”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

GRICELDA GABRIELA VARELA GONZÁLEZ

COMITÉ TUTOR

Dr. Antonio Cardona Benavides
Dr. Francisco Martín Romero

JURADO EXAMINADOR

- 1) Dr. Rafael Huizar Alvarez
- 2) Dr. Luis Miguel Mitre Salazar
- 3) Dr. Francisco Martín Romero
- 4) Dr. Antonio Cardona Benavides
- 5) Dr. Eduardo Hidalgo Graniel Castro



MÉXICO D.F., JUNIO DE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Gracias a Dios por dirigir mi camino
“En lugares de delicados pastos me hará descansar;
Junto a aguas de reposo me pastoreará.
Confortará mi alma”.
Salmos 23

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su amor, sus consejos, su apoyo incondicional, los valores que me han transmitido, gracias por ser maravillosos, los llevo siempre conmigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi Alma Mater, por ofrecerme una vez mas sus instalaciones y recursos para mi preparación en posgrado, especialmente al Instituto de Geología, gracias. Por mi raza hablará el Espíritu!, lema que permanecerá toda mi vida en mi corazón.

Al Dr. Rafael Huizar Alvarez por haberme transmitido sus conocimientos en el campo del Agua Subterránea, y porque además de ser un gran tutor ha sido un gran amigo y apoyo en mi camino.

A mi jurado para Examen de Grado, Dr. Eduardo Hidalgo Graniel Castro, Dr. Francisco Martín Romero, Dr. Antonio Cardona Benavides y Dr. Luis Miguel Mitre Salazar; gracias por el tiempo dedicado a la revisión de este texto, sus valiosas observaciones fueron de gran ayuda para finalizar mi trabajo.

A Carlos A. Jimenez y Ma. Magdalena Espinoza por su colaboración en el trabajo de campo y gabinete para que fuera posible este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyarme económicamente para realizar los estudios de maestría.

A las autoridades del Sistema Operador de Agua Potable y Saneamiento (SOAPSA) por haber otorgado los permisos correspondientes para llevar a cabo el muestreo de agua subterránea y las diferentes pruebas realizadas dentro de sus instalaciones.

Al M. Q. Faustino Juárez Sánchez, responsable del Laboratorio de Radioactividad Natural del Instituto de Geofísica, por su apoyo en la realización de los análisis físico-químicos de las muestras de agua subterránea.

Al Quim. Rufino Lozano Santa Cruz, responsable del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X-LUGIS, por su apoyo en la realización del análisis geoquímico de las muestras de roca.

Al Sr. Joaquín Aparicio del Taller de laminación, por la elaboración de cápsulas para determinar flúor.

A mis amigos Ivonne Montiel, Julio C. Pérez, Miriam Flores, Juan Oropeza; Carlos Alvar, Thalia, Geovani, Norberto; por compartir su amistad conmigo.

INDICE

RESÚMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos	5
	1.2.1 Objetivos específicos	5
1.3	Hipótesis	6

CAPÍTULO II. EL FLÚOR Y EL AGUA SUBTERRÁNEA

2.1	Características químicas del Flúor	7
	2.1.1 Características físicas del Flúor	7
2.2	El Flúor en la naturaleza	8
	2.2.1 Fuentes minerales	8
	2.2.2 La presencia de Flúor en las rocas	9
	2.2.3 Fuentes atmosféricas	10
	2.2.4 Usos del Flúor	11
2.3	Flúor en el agua	11
	2.3.1 Flúor y pH del agua	13
2.4	El Flúor y la salud	15
2.5	Daños a la salud en Tenextepango, Cuautla	18

CAPÍTULO III. MARCO FÍSICO

3.1	Localización	20
3.2	Vías de comunicación	21
3.3	Uso del suelo	21
3.4	Geomorfología de la región de Tenextepango	23
	3.4.1 Relieve endógeno	23
	3.4.1.1 Relieve Tectónico Modelado	23
	3.4.1.2 Relieve Volcánico Modelado	24
	3.4.1.3 Relieve Plicativo Modelado	24
	3.4.2 Relieve Exógeno	25
	3.4.2.1 Relieve acumulativo aluvial	25
	3.4.2.2 Relieve acumulativo erosivo	26
	3.4.2.3 Relieve erosivo fluvial	26
3.5	Hidroclimatología	28
	3.5.1 Precipitación	28
	3.5.2 Temperatura	29
	3.5.3 Clima	31
	3.5.3.1 Awo(w)(i')g	31
	3.5.3.2 (A)C(w1)(w)ig	31
	3.5.4 Evapotranspiración	32
	3.5.5 Hidrografía	34

CAPÍTULO IV. MARCO GEOLÓGICO

4.1 Contexto geológico regional	37
4.1.1 Plataforma Morelos- Guerrero	37
4.1.2 Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)	38
4.2 Contexto Geológico Local	39
4.3 Sondeos Geofísicos	42
4.3.1 Unidad Geoeléctrica U1: Capa de cobertura	43
4.3.2 Unidad Geoeléctrica U2	43
4.3.3 Unidad Geoeléctrica U3	44
4.3.4 Perfiles de Resistividad	44
4.3.4.1 Perfil Geoeléctrico	44
4.4 Estratigrafía de la Zona	45
4.4.1 Formación Morelos	46
4.4.2 Formación Cuautla	48
4.4.3 Formación Mexcala	51
4.4.4 Grupo Balsas	52
4.4.5 Formación Tlaica	54
4.4.6 Grupo Ixtlilco	56
4.4.7 Formación Tlayecac	60
4.4.8 Aluvión	61
4.4.9 Racas ígneas Intrusivas (Tronco Xalostoc)	62
4.4.10 Cuerpo metamórfico	63
4.5 Marco Estructural de la región de Tenextepango, Cuautla	63
4.5.1 Estructuras locales	65

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA

5.1 Análisis de datos meteorológicos	70
5.2 Cartografía geológica	71
5.3 Sondeos Geofísicos	72
5.4 Trabajo de gabinete	72
5.4.1 Clasificación de muestras de roca	73
5.5 Muestreo de agua subterránea	74
5.5.1 Actividades previas a la salida de campo	76
5.5.2 Procedimiento para el muestreo	76
5.6 Medición de parámetros de campo	78
5.6.1 Temperatura	78
5.6.2 pH	79
5.6.3 Potencial Redox	79
5.6.4 Conductividad eléctrica	80
5.6.5 Alcalinidad	80
5.6.6 Registro de datos constructivos e hidrodinámicos de pozos	81
5.6.7 Pruebas de bombeo	82
5.7 Captación de agua de lluvia	82
5.8 Experimento de Interacción Agua-Roca	84
5.8.1 Montaje del experimento	84
5.8.2 Material, equipo y soluciones empleados en el experimento	85
5.9 Técnicas de análisis de laboratorio	86
5.9.1 Análisis geoquímico de las rocas	86

5.9.2	Análisis químicos de agua	87
5.9.2.1	Determinación de aniones	87
5.9.2.2	Determinación de cationes	88
5.9.2.3	Determinación de tritio	90
5.9.2.4	Isótopos estables: Deuterio y Oxígeno 18	91
CAPÍTULO VI. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL		
6.1	Hidrogeología Regional	92
6.2	Hidrogeología Local	93
6.2.1	Unidades Hidrogeológicas de la zona de Tenextepango-Tepalcingo, Cuautla	93
6.2.1.1	Unidad hidrogeológica intergranular	95
6.2.1.2	Unidad hidrogeológica fisurada	95
6.3	Tipo de acuífero	96
6.4	Nivel Estático	99
6.4.1	Gradiente hidráulico	101
6.4.2	Dirección de flujo subterráneo	101
6.5	Condiciones de frontera del flujo	101
6.5.1	Fronteras de carga constante de entrada	102
6.5.2	Fronteras de carga constante de salida	102
6.5.3	Límite impermeable o basamento	102
6.6	Isótopos Estables	102
CAPÍTULO VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
7.1	Composición química del agua subterránea	106
7.1.1	Resultados de aniones y cationes	106
7.1.2	Resultados de análisis de fluoruros	110
7.2	Geoquímica de rocas	115
7.2.1	Elementos Mayores	116
7.2.2	Elementos Traza	116
7.2.3	Flúor en las rocas de la región de estudio	119
7.3	Experimento de Interacción agua-roca	119
7.3.1	Contenido de cationes en lixiviado de muestras tamaño arcillas	122
7.3.1.1	Agua de lluvia	123
7.3.1.2	Agua destilada	124
7.3.2	Contenido de aniones en lixiviado de muestras tamaño arcillas	125
7.3.2.1	Agua de lluvia	125
7.3.2.2	Agua destilada	125
7.3.3	Contenido de cationes en lixiviado de muestras tamaño grava	127
7.3.3.1	Agua de lluvia	127
7.3.3.2	Agua destilada	128
7.3.4	Contenido de aniones en lixiviado de muestras tamaño grava	129
7.3.4.1	Agua de lluvia	129
7.3.4.2	Agua destilada	130
7.3.5	Flúor en el agua del experimento Interacción agua-roca	131
7.4	Fluoruro en el agua subterránea en la región de Tenextepango	132
7.4.1	Mecanismos de liberación de Flúor dentro del acuífero	132
7.4.2	Procesos naturales que controlan la ocurrencia del fluoruro	

en el acuífero	134
7.4.3 Procesos que afectan la movilización y transporte de fluoruros en el acuífero	134
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
8.1 Conclusiones	138
8.2 Recomendaciones	142
BIBLIOGRAFÍA	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Entidades políticas de México donde se han presentado problemas de fluorosis dental	5
Figura 2.1 Curva dosis-respuesta de los niveles aproximados de Flúor, necesarios para presentar diversas respuestas en el cuerpo humano ante su ingesta	16
Figura 2.2 Casos de fluorosis dental incipiente avanzada (a) y severa (b) en la zona de Tenextepango, Cuautla	19
Figura 3.1 Ubicación geográfica del área de Tenextepango, Cuautla	20
Figura 3.2 Distribución de los diferentes climas en la planicie de Tenextepango, Cuautla Morelos. Fuente García (1997), con modificaciones del autor.	32
Figura 3.3 Hidrografía de la zona de Tenextepango.	36
Figura 4.1 Comparación de la columna estratigráfica entre la porción occidental y la porción oriental del estado de Morelos	41
Figura 4.2 Localización de los sondeos geofísicos dentro del área de estudio	42
Figura 4.3 Perfil geoelectrico de la zona de Tenextepango, Cuautla	45
Figura 4.4 Afloramiento y tipo de estructuras de la Formación Morelos	47
Figura 4.5 Conglomerado Balsas	53
Figura 4.6 Rosetas locales agrupadas en cinco zonas (a, b, c, d, y e)	66
Figura 4.7 Visión regional de las fracturas de la zona.	67
Figura 4.8 Afloramiento de ignimbrita de la Formación Tlaica, al oeste de San Vicente Juárez que muestra una falla lateral izquierda con azimut de 225°.	68
Figura 5.1 Ubicación de los sitios donde se obtuvieron muestras de agua para análisis químico e isotópico, muestras de roca para lámina delgada y para el experimento de interacción agua-roca, también se ubican las secciones geológicas y sondeos geofísicos.	75
Figura 5.2 Manguera adaptada a la válvula de descarga del pozo (a). Celda Para medir parámetros físico-químicos y recipiente de donde se tomarán las muestras (b).	76
Figura 5.3 Celda de aislamiento de flujo continuo para medición de parámetros de campo	78
Figura 5.4 Procedimiento de titulación en el campo.	81
Figura 5.5 Estación para captar agua de lluvia	84
Figura 5.6 Experimento de interacción agua-roca, agitado diariamente por periodos de 20 minutos (a). Separación de agua-roca por filtración de decantación por vacío (b).	86
Figura 6.1 Bloque isométrico del modelo hidrogeológico conceptual del área de Tenextepango	98
Figura 6.2. Dirección del flujo subterráneo de la zona de Tenextepango, Cuautla	100
Figura 6.3 Relación meteórica para ^{18}O y $\delta^2\text{H}$ en precipitación. Datos promediados para precipitación anual monitoreada en la red global de la estación IAEA (Rozanski, <i>et al.</i> , 1993)	105
Figura 7.1 Distribución espacial de las facies hidroquímicas en la zona de Tenextepango, Cuautla.	108
Figura 7.2 Diagrama de Piper para la zona de estudio	109
Figura 7.3 Distribución espacial del Flúor en el agua subterránea de Tenextepango – Tepalcingo, Morelos.	112

Figura 7.4 Solubilidad de la fluorita y calcita en un agua pura a presión y temperatura atmosférica normal.

136

Figura 7.5 Solubilidad de la fluorita en un sistema abierto y en uno cerrado

136

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Concentración de Flúor en diversos tipos de roca	10
Tabla 2.2 Algunos de los alimentos que contienen fluoruros	18
Tabla 3.1 Promedio anual de lluvia obtenida de los datos diarios proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA	28
Tabla 3.2 Temperatura media anual obtenida a partir de datos diarios de temperatura proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA	30
Tabla 3.3 Evapotranspiración media anual.	33
Tabla 3.4 Volumen anual de los canales de la zona de Tenextepango, Cuautla.	35
Tabla 4.1 Estudio geofísico para estimar las características hidrogeológicas en la población de Huitzililla, municipio de Ayala, Estado de Morelos	43
Tabla 5.1 Características del muestreo de acuerdo al parámetro a analizar	77
Tabla 5.2 Límites de detección de aniones por el método Cromatografía de Líquidos	88
Tabla 5.3 Límites de detección de aniones por el método Cromatografía Iónica	88
Tabla 5.4 Límites de detección de aniones por el método Espectrometría de Absorción Atómica	89
Tabla 5.5 Límites de detección de aniones por el método ICP-MS	89
Tabla 6.1 Unidades hidrogeológicas y su equivalencia en unidades geológicas	94
Tabla 6.2 Resultados de las pruebas de bombeo realizadas en la zona	94
Tabla 6.3 Conductividades hidráulicas de los materiales de la unidad hidrogeológica Intergranular	95
Tabla 6.4 Conductividades hidráulicas de la roca consolidada encontrada en el área de estudio	96
Tabla 6.5 Nivel estático de los pozos de la región de Tenextepango, Cuautla	99
Tabla 6.6 Contenido isotópico de oxígeno, deuterio y tritio, en el agua subterránea en la región de Tenextepango, Morelos	104
Tabla 7.1 Composición química del agua subterránea de la zona de Tenextepango	107
Tabla 7.2 Resultados de análisis de fluoruro en pozos de la región de Tenextepango, Cuautla.	110
Tabla 7.3 Coeficiente de correlación entre las concentraciones de fluoruro y aniones y cationes en el agua subterránea de Tenextepango, Cuautla	114
Tabla 7.4 Parámetros físico-químicos del agua subterránea medidos en campo	114
Tabla 7.5 Correlación de la concentración (C.C) de fluoruros vs parámetros físico-químicos del agua subterránea de la zona de estudio	111
Tabla 7.6 Resultados de la clasificación de láminas delgadas de la zona de estudio.	115
Tabla 7.7 Análisis geoquímico de rocas de la zona de Tenextepango, Cuautla para elementos mayores. Los valores se muestran en % en peso.	117
Tabla 7.8 Análisis geoquímico de rocas de la zona de Tenextepango, Cuautla para elementos traza. Los valores están dados en ppm.	118
Tabla 7.9 Análisis geoquímico de rocas para arsénico y fluoruro. Los análisis se muestran en porcentaje en peso (%).	119
Tabla 7.10 Número de muestra utilizada en el experimento y su clasificación.	120
Tabla 7.11 Condiciones iniciales del agua utilizada en el experimento	120

Tabla 7.12	Parámetros físico-químicos del agua de lluvia utilizada en muestras fracción arcilla	121
Tabla 7.13	Parámetros físico-químicos del agua de lluvia utilizada en muestras fracción grava	121
Tabla 7.14	Parámetros físico-químicos del agua destilada utilizada en muestras fracción arcilla	121
Tabla 7.15	Parámetros físico-químicos finales del agua de destilada utilizada en muestras fracción grava	122
Tabla 7.16	Contenido de Flúor obtenido en el lixiviado del experimento interacción agua roca, en rocas de la zona de estudio. Cantidades dadas en mg/L.	132
Tabla 7.17	Equilibrio del fluoruro en función de la actividad del Calcio.	135

INDICE DE GRAFICAS

Gáfica 3.1 Cantidad de precipitación media anual para cada estación meteorológica y precipitación media para toda la zona de estudio.	29
Gráfica 3.2 Valor de la temperatura media anual en la zona de Tenextepango	30
Gráfica 3.3 Climograma que compara los valores de evapotranspiración (a) y de precipitación (b) por estación meteorológica y como un atributo más la temperatura media anual (c) en la región de Tenextepango	34
Grafica 6. 1 Comparación de valores de $\delta^{18}\text{O}$ ‰ y δD ‰ de la zona de Tenextepango, Cuautla.	105
Grafica 7.1 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en <i>agua de lluvia</i> .	123
Grafica 7.2 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en agua destilada.	124
Grafica 7.3 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en agua de lluvia.	125
Gráfica 7.4 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en agua destilada.	126
Grafica 7.5 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en <i>agua de lluvia</i> .	127
Grafica 7.6 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en <i>agua destilada</i> .	128
Grafica 7.7 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en agua de lluvia.	129
Grafica 7.9 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en agua destilada.	130

MAPAS

Mapa 1. Usos de suelos en Tenextepango, Cuautla	22
Mapa 2. Geomorfología de la región de Tenextepango, Cuautla	27

ANEXOS

Anexo A Mapa Geológico de la zona de Tenextepango Cuatla.	
Anexo B Clasificación de láminas delgadas.	
Anexo C Lista de material para muestreo de agua subterránea y formatos para captura de datos en campo de pruebas de bombeo .	
Anexo D Pruebas de bombeo procesadas	
Anexo E Tablas de resultados de análisis químicos.	

RESUMEN

El contenido de fluoruro en el agua subterránea de la región de Tenextepango, Morelos, varía entre 0.2 y 1.9 mg/L, esa concentración está originando un problema de fluorosis dental en la población local.

Para identificar fuentes de fluoruro, inicialmente se realizó el análisis físico químico del agua de los pozos y manantiales que abastecen a la población. Odontólogas de la Universidad Autónoma Metropolitana efectuaron un examen clínico visual a jóvenes y niños en las diferentes poblaciones de la zona, para conocer el nivel de fluorosis. Se elaboró la cartografía geológica de la región apoyada con análisis petrográfico y geoquímico de roca y un experimento de interacción agua-roca, para conocer que roca libera más flúor. Como resultado se tiene que el contenido promedio de fluoruro en el agua subterránea es de 0.85 mg/L; no obstante, es suficiente para ocasionar fluorosis dental en la población local. De un total de 25 muestras de agua, el 20% contiene fluoruro que rebasa el límite máximo permisible establecido para el consumo humano. Por lo tanto, la población presenta diferentes grados de fluorosis dental, en particular en la localidad de Tenextepango. En el experimento de interacción agua roca, el agua de lluvia resulto ser más agresiva que la destilada para disolver iones. Y con respecto al tipo de material, la fracción arcilla es la que libera mayor porcentaje de iones. Al relacionar el contenido de fluoruro y el marco geológico, se concluye que éste se asocia con un medio geoquímicamente alcalino que predomina en el área de estudio. Asimismo, los sitios donde existe alto contenido de éste ion, se relaciona con el reciente arribo de un sistema de flujo intermedio, y en parte por la influencia de la actividad volcánica del Popocatepetl; así como de las características físico-químicas del agua.

ABSTRACT

The groundwater fluoride content in Tenextepango region, Morelos, varies between 0.2 and 1.9 mg /L, this concentration is causing a dental fluorosis problem in local population.

For identify fluoride sources, initially we made the physical and chemical water analysis from wells and springs that supply the population. Dentist of Universidad Autónoma Metropolitana conducted a visual clinical examination on children in different populations of study area for ascertain fluorosis level. In particular, 400 children aged 9 years, from Tenextepango village. Geological mapping was developed on region, supported by petrographic and geochemical rocks analysis and an experiment water-rock interaction, for knowing that rock releases more fluoride. We find average fluoride content in groundwater is 0.85 mg /L, however, is enough for causing dental fluorosis in local population. A total 25 water samples, 20% exceed fluoride permissible maximum limit set for human consumption; therefore, people have different dental fluorosis degrees, particularly in Tenextepango town, where children proportion presents moderate and severe dental fluorosis categories.

Rock water interaction experiment, rain water turned out to be more aggressive than distilled water for dissolving ions. And regarding the type of material, the clay fraction is the highest percentage of released ions.

Linking fluoride content and geological framework, we conclude that it is associated with alkaline geochemically environment which predominates in the study area. Also, places with high fluoride content are related with a recent intermediate flow system arrival, and popocatepetl's volcanic activity influence, as well as physical and chemical water properties.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La calidad del agua es un factor que puede influir en la salud de la población que consume esa agua; y se determina por la cantidad de solutos y gases disueltos, por la materia suspendida y flotante, así como el contenido y tipo de bacterias. La calidad depende de los procesos hidrogeoquímicos naturales y de alguna alteración ocasionada por las actividades humanas. La calidad determinará para qué tipo de uso es más apropiada.

Para el caso de consumo humano, es importante que el contenido de ciertos elementos químicos no superen los límites máximos permisibles para el organismo humano. Este es el caso del fluoruro, que después de cierta cantidad puede representar un riesgo a la salud. Desde los últimos 30 años del siglo XIX, se reconoció que el fluoruro aporta dureza y persistencia al esmalte dental y lo protege de la caries.

En 1931, Smith *et al.*, informaron que, "El flúor es responsable del esmalte moteado" y denominaron a este padecimiento "Fluorosis Endémica". En 1938, Trendley Dean, dio a conocer el nivel máximo de fluoruro aceptable en el agua, y encontró que la fluorosis no sólo dependía de la concentración de fluoruros en el agua, sino también de la cantidad de agua bebida (Smyth Chamosa *et al.*, 1992).

Russell y Elvove (1951), establecieron que la presencia de fluoruros en agua bebida durante el periodo de la formación dental producía una marcada disminución en la prevalencia de caries dental, estando el grado de efectividad directamente relacionado con la concentración de fluoruros hasta valores de 1.5 ppm.

De esta manera, desde 1958 y con base en el informe de un Comité de Científicos de la OMS (OMS, 1958), donde se señalan los efectos observados al administrar suplementos fluorados en el agua para beber; y que apoyaban la adición de fluoruro al agua como

método sanitariamente correcto; la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1969) recomienda a los países, la puesta en marcha de medidas necesarias para adicionar fluoruro al agua destinada al consumo humano y en caso de no ser posible, estudiar métodos de fluoración para proteger la salud dental.

Para 1978, éste organismo de salud consideró que el Flúor es la medida más eficaz para prevenir y disminuir la caries dental en los programas orientados a la comunidad.

Posteriormente, se han hecho observaciones en poblaciones expuestas y no expuestas al elemento flúor en agua subterránea y se ha encontrado que dicho elemento podría incluso, ser perjudicial para los dientes (Zan-dao y Yan, 2002).

El síntoma mejor definido hasta hoy detectado, para un consumo excesivo de fluoruros es la fluorosis dental, una mayor exposición puede resultar en fluorosis esquelética. También causa cambios en los huesos como esclerosis (mayor densidad ósea), calcificación de las inserciones musculares y exostosis, también se ha asociado a defectos de nacimiento y cáncer. (FAO, 2010, Hamilton, 1992; Marshall, 1990).

El consumo de agua con un contenido de Flúor (F⁻) mayor a 1.5 mg/l causará fluorosis dental en la población (Secretaría de Salud y Asistencia (SSA), 1994). No obstante, las concentraciones para que se presenten dichos efectos varían de acuerdo a diversos factores: la nutrición, deficiencias de calcio y vitamina C, que resultan importantes para controlar los excedentes de fluoruros en la dieta.

No obstante, hoy día, el alto contenido de fluoruro disuelto en agua subterránea destinada al consumo humano, se ha vuelto un problema mundial; en países como Argentina, Canadá, Chile, China, Estados Unidos, Hungría, India, Italia, México, Pakistán y Vietnam, entre otros se han reportado problemas de salud, a partir de la ingestión de agua con niveles importantes de fluoruros (Smedley y Kinniburgh, 2002; Edmunds y Smedley, 2005).

En México, las concentraciones de fluoruro disuelto en el agua subterránea varían desde 0.05 mg/L hasta 25 mg/L. Las regiones del territorio nacional donde se han detectado alto contenidos de este elemento en el agua subterránea son: el norte y noroeste; principalmente en Los Altos de Jalisco, la región central de México, ubicada en la Faja Volcánica Mexicana, caracterizada por tener gran actividad hidrotermal. De acuerdo con los estudios realizados por Hurtado y Gardea-Torresdey (2004), el agua del 42% de los municipios de esas regiones presentaba altas concentraciones de fluoruros que están por arriba del límite máximo recomendado por la OMS, y adoptado por la normatividad mexicana, 1.5 mg/L.

En el estado de Aguascalientes, se ha observado que el fluoruro proviene de minerales fluorados de las rocas que constituyen la estructura geológica del acuífero, y como consecuencia, el 43.7% de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea presentan concentraciones de fluoruro superiores a la norma (Bonilla-Petriciolet *et al.*, 2002).

En una población escolar de Salamanca, Guanajuato, la fluorosis resultó más marcada en niñas que en niños, ambos de 12 a 15 años de edad. (Ortiz *et al.*, 1996). Juárez *et al.* (2003), reportan que en la delegación Iztapalapa, D.F, del 59% de casos existentes de fluorosis, presentó más frecuencia en niñas que en niños.

En la Comarca Lagunera, situada en la parte norte de México, se han reportado concentraciones de fluoruros en el agua subterránea entre 0.5 a 25 mg/L (Del Razo *et al.*, 1993). De acuerdo con el mismo autor, el área rural de la Región Lagunera, es la que presenta las más altas concentraciones de fluoruro; los bajos niveles de los mismos, se ubican en la zona suroeste de dicha Región, así como en las ciudades de Torreón, Coahuila, y en Gómez Palacios y Lerdo, en el estado de Durango.

Según Molina (1996), en el Valle de Guadiana, el agua subterránea está caracterizada por un muy alto contenido de fluoruro, llegando a tener 12 mg/L, en consecuencia, todos los niños presentaron fluorosis dental, de los cuales el 35% había sufrido un daño severo en sus dientes, además sufrían fracturas en los huesos, tanto niños como adultos.

De acuerdo con Huizar-Alvarez (comunicación oral, 2010), en el municipio La Llave, del estado de Querétaro, se han detectado casos de fluorosis dental severa en la población infantil, la cual es resultado del consumo de agua con un contenido de fluoruro de 1.94 mg/L.

Ortega-Guerrero (2009), reportó altas concentraciones de fluoruros en el agua subterránea de la cuenca Alta del Río La Laja, en el noreste de Guanajuato; las concentraciones varían entre 1.5 y 16 mg/L. De acuerdo con éste autor, el enriquecimiento en Flúor se debe a la disolución de fluorita, al alto contenido de HCO_3^- y Na^+ , producto de la disolución de feldespato sódico, y de otros minerales que constituyen las riolitas e ignimbritas de esa cuenca.

Carrillo-Rivera *et al.* (2002), reportan contenidos de fluoruro de 2.10 a 3.65 mg/L, en el agua subterránea de San Luis Potosí, y lo asocian con un flujo regional que tiene una temperatura de 33.8 y 44.4 °C que circula por rocas ácidas, a partir de esto, deducen que la interacción agua- roca a estas temperaturas, da como resultado la disolución de minerales primarios o de la matriz vítrea de la roca. Tristan (1983), reportó un contenido de

0.2% en peso de flúor en las rocas ácidas de San Luis Potosí, que corresponden con los valores mencionados por Carrillo-Rivera *et al.* (2002).

En los estados de Chihuahua y Sonora, existe de 4.8 a 5.9 mg/L de fluoruro en el agua subterránea; mientras que el campo geotérmico Los Azufres, Michoacán, destaca con niveles de fluoruros de 17 mg/L en el agua subterránea, y hasta 24 mg/L, en agua superficial (Armienta y Segovia 2008).

Según Carrillo-Rivera *et al.* (2007), todo el Norte de México, incluyendo la península de Baja California presenta altas concentraciones de Fluoruro en el agua subterránea; y los efectos en la salud dental en la población, son de fluorosis dental de moderada a severa. La figura 1.1 muestra las entidades políticas de nuestro país donde se han detectado concentraciones de fluoruro en el agua subterránea.

De manera contrastante, y de acuerdo con dichos autores, en todo el centro-sur y sureste del territorio nacional, no se reporta contenidos importantes de fluoruro el agua subterránea, y por lo tanto, "no hay problemas de fluorosis".

Sin embargo, en el año 2008, odontólogas de la Universidad Autónoma Metropolitana, identificaron la presencia de fluorosis dental severa en la ciudad de Tenextepango, Morelos. Esto indujo a extender geográficamente el área de estudio para diagnosticar fluorosis en la región, la evaluación se realizó en las escuelas primarias de esas localidades y como resultado se obtuvo que existan diferentes grados de fluorosis dental en esta región, siendo la ciudad de Tenextepango la más afectada.

Hasta la fecha, la Secretaria de Salubridad y Asistencia, considera a la región centro-sur y sureste de México, como un área sin problemas de fluorosis. Sin embargo, el identificar la presencia de esa enfermedad bucal en Tenextepango, Cuautla, Morelos, es motivo suficiente para realizar esta investigación y junto con especialistas en odontología, investigar los niveles de fluoruro en el agua subterránea en esa zona, su procedencia y su efecto en la salud de la población. Este estudio es entonces el pionero de hidrogeología ambiental en esta región del territorio mexicano; donde se enfatiza a examinar la relación entre geología y agua subterránea.



Fig. 1.1 Entidades políticas donde se han presentado problemas de fluorosis.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es identificar las fuentes, procedencia y procesos de transporte del flúor en la región de Tenextepango -Tepalcingo.

1.2.1 Objetivos específicos

- Elaborar la cartografía geológica de la zona de estudio.
- Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual de la región,
- Establecer las características hidroquímicas del agua subterránea y su regionalización.

- Realizar un experimento de interacción agua-roca para conocer la cantidad y velocidad de disolución de Flúor en diferentes tipos de roca. Caracterizar la trayectoria y tiempo de residencia del agua subterránea en la región de Tenextepango -Tepalcingo.

1.3 HIPÓTESIS

- Las rocas volcánicas ácidas e intermedias de la zona de estudio contienen grandes cantidades de minerales accesorios, es decir, minerales que no son principales formadores de roca como los anfíboles y la biotita, que pueden aportar grandes cantidades de Flúor al agua subterránea; que de acuerdo con Chae *et al.* (2005), tienen la capacidad de disolver en ese tipo de rocas hasta 6 mg/L de Flúor.
- El reinició de la actividad del volcán Popocatepetl hace aproximadamente 15 años, originó una actividad hidrotermal, que a su vez, es fuente de fluoruros (Aswathanarayana *et. al.*, 1985; Hyndman, 1985; Dolejs and Baker 2004).
- Los cambios en los hábitos alimenticios han generado un cambio en el metabolismo de la población, y la hace más propensa a los daños de salud bucal ocasionados por la ingesta de fluoruros contenidos en el agua que beben (Dissanayake and Chandrajith, 2009).
- El agua para riego proviene de manantiales termales como Agua Hedionda y Atotonilco, así como del agua residual de áreas urbanas situadas al norte de la zona de interés que viajan a través de un canal. Esta podría ser una importante fuente de Flúor ya que la agricultura de riego es la principal actividad económica en esta zona (Valencia-Díaz y Carrasco-Carnadillo, 2006).

II. EL FLUOR Y EL AGUA SUBTERRÁNEA

El Flúor es uno de los elementos traza más importantes para la salud humana, que se obtiene principalmente del agua subterránea, así mismo algunos alimentos son otra fuente importante de este elemento. De ahí que pequeñas cantidades de Flúor en la dieta humana pueden ayudar a prevenir la caries dental, y a fortalecer los huesos. Sin embargo, en cantidades altas, el Flúor puede llegar a ocasionar daños a la salud que pueden ser ligeros o muy severos.

2.1 Características químicas del Flúor

Este elemento químico ocupa el número 9 en la tabla periódica y está dentro del grupo VII, denominado los halógenos, es decir, no es un metal, es formador de sales. Es el elemento más electronegativo de la naturaleza (electronegatividad 4), motivo por el cual siempre se encuentra formando compuestos (Hem, 1985). Tiene una masa atómica de 19 y un peso atómico de 18.9984 u.m.a; presenta 12 isótopos inestables (^{15}F a ^{27}F) y un isótopo estable F^{19} ; y por lo tanto, éste es el de mayor ocurrencia en la naturaleza, su configuración electrónica en la última capa de valencia es $1s^2 2s^2 2p^5$ (Haszeldine and Sharpe, 1951; Reimann y De Caritat, 1998; Chang, 2003).

2.1.1 Características físicas del Flúor

Su estado físico y puro corresponde a un gas profundamente tóxico, debido a su gran actividad no existe libre en la naturaleza, se encuentra siempre combinado formando

compuestos denominados fluoruros. Su color es amarillo claro pero combinado adquiere una gama de tonalidades, tiene olor irritante, su punto de fusión es de $-223\text{ }^{\circ}\text{C}$ y hierve a los $-187\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Haszeldine and Sharpe, 1951; Herazo, 1988).

2.2 El Flúor en la naturaleza

De acuerdo con Edmunds and Smedley (2005), el Flúor es uno de los elementos traza más abundantes en la corteza terrestre, sin embargo, su ocurrencia varía ampliamente de un tipo de roca a otra.

2.2.1 Fuentes minerales

El mineral con mayor contenido de Flúor es la Fluorita, también conocida como Fluorespato o Fluoruro de Calcio. La fluorita cristaliza en el sistema cúbico y puede ser de color verde, azul, amarillo o violeta y muestran una débil fluorescencia, tiene dureza 4 en la escala de Mohs, su densidad varía entre 3 y 3.25 g/cm^3 . Tienen una solubilidad muy baja y ocurre en forma de filones, a veces junto a menas metálicas de plomo, zinc, plata. También en minerales accesorios de rocas ígneas y pegmatitas. De acuerdo con Rankama y Sahama (1950), las rocas ricas en metales alcalinos, y minerales como la obsidiana, son los minerales que contienen altas cantidades de Flúor.

Los más grandes yacimientos de fluorita en el mundo fueron encontrados en Estados Unidos (Illinois y Kentucky), Inglaterra (Derbyshire) y al sur de Alemania, existen otros yacimientos importantes en Francia, España, Italia y México (Haszeldine and Sharpe, 1951). Otro mineral importante en cuanto a su contenido de Flúor es la Criolita (fluorualuminato de sodio Na_3AlF_6), es el mineral preferido en la industria debido a su bajo punto de fusión al igual que su temperatura de descomposición. Puede presentarse en color grisáceo blanco o amarillo, en cristales monoclinicos, lustre vítreo o grasoso, tiene una dureza de 2.5 en la escala de Mohos. El yacimiento más conocido de éste elemento está en Ivigtut, Groenlandia, también se han hallado otros en los Montes Urales (Haszeldine and Sharpe, 1951; Herazo, 1988).

De acuerdo con los mismos autores, el Fluorapatito (Fluoruro de Calcio y Fosfato $\text{CaF}_2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), también es un mineral con un importante contenido de Flúor, es el principal componente de los fosfatos de roca. Existen grandes yacimientos de este mineral en Estados Unidos, Rusia, al norte de África y las Islas del Pacífico y del Archipiélago de las Antillas. Generalmente se encuentran como depósitos sedimentarios por lo general de origen marino.

Por otra parte, existe una gran ocurrencia de Flúor en ciertos minerales silicatados como es el Topacio ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$), Lepidolita (mica), que puede contener hasta un 8% de Flúor y anfíboles; dichos minerales son el resultado del reemplazamiento isomorfo del hidroxilo por fluoruro. Algunas arcillas también pueden contener Flúor (Haszeldine and Sharpe, 1951; Herazo, 1988; Edmunds and Smedley, 2005).

2.2.2 La presencia de Flúor en las rocas

Los más grandes yacimientos de Flúor se encuentran en rocas ígneas y metamórficas, asociados estrechamente con la actividad hidrotermal, esto como resultado de que este ion tiene muy alta afinidad con los silicatos fundidos, con respecto a las fases sólidas. De esta forma es enriquecido progresivamente dentro de los magmas y soluciones hidrotermales a través de la diferenciación magmática, su presencia y abundancia también está relacionada con el porcentaje de calcio y silicio contenido en el magma; de esto resulta que los yacimientos en vetas hidrotermales y rocas que cristalizan de magmas, a menudo contiene Fluorita, Fluorapatito y micas enriquecidas en Flúor y/o anfíboles (Hyndman, 1985; Dolejs and Baker 2004).

De acuerdo con Hyndman (1985) y Chae *et al.* (2007), las rocas que tienen altos contenidos de Flúor son: sienitas, granitos, monzonitas de cuarzo, granodioritas, gneis félsicos y de biotita.

La incidencia de Flúor varía ampliamente de un tipo de roca a otra, de acuerdo con Reimann y De Caritat (1998) y Hem (1985), el contenido aproximado de Flúor en los diferentes tipos de rocas se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Concentración de Flúor en diversos tipos de rocas (Reimann y De Caritat, 1998 y Hem, 1985).

Corteza/Roca	Concentración (mg/Kg)	
	Reimann y De Caritat (1998)	Hem (1985)
Corteza continental superior	611-650	
Rocas ultramáficas	20	100
Gabro, basalto	300	2000
Granito-granodiorita	800	1000
Arenisca	200	
Lutita, esquisto	700	1300
Caliza	300	1000
Carbón	50	

Los yacimientos de Flúor en rocas de origen sedimentario formadas por arcillas ricas en Flúor, o sedimentos marinos (calizas), son poco frecuentes (Edmunds and Smedley, 2005).

El fluorapatito es un mineral con alto contenido de Flúor, puede provenir de rocas carbonatadas, depósitos argiláceos u originarse por precipitación del agua rica en fosfato (Haszeldine and Sharpe, 1951).

2.2.3 Fuentes atmosféricas

De acuerdo con Angelis and Legrand (1994), las principales fuentes naturales de emisión de Flúor a la atmósfera provienen de gases volcánicos, polvo contenido en suelos fluorurados y partículas de agua del mar. De acuerdo con Ozsvath (2009), el Flúor en la atmósfera no ha sido ligado directamente a problemas de salud humana.

En lo que respecta a fuentes antropogénicas de Flúor, éste puede provenir de aerosoles industriales, producción de hierro y acero, incineración de carbón, industria cerámica y plantas de fosfato fertilizante (Herazo, 1988; Ozsvath, 2009).

2.2.4 Usos del Flúor

Los Halógenos y sus compuestos tienen muchas aplicaciones en la industria, en el cuidado de la salud y en otras áreas. Uno de los más importantes es la fluoración, que consiste en agregar pequeñas cantidades de fluoruros (1 ppm aproximadamente) tales como Na^+F^- al agua potable para reducir las caries dentales, o aplicarlo directamente a los dientes para eliminar el peligro de caries dentales. El fluoruro inorgánico más importante es el hexafluoruro de uranio, UF_6 , que es esencial en el proceso de separación gaseosa para los isótopos de Uranio (U-235 y U-238). En la industria, el Flúor se utiliza para producir un polímero conocido cotidianamente como teflón, utilizado en aislantes eléctricos, plásticos de alta temperatura y utensilios de cocina, cerámica, vidrio, insecticida entre otros.

2.3 Flúor en el agua

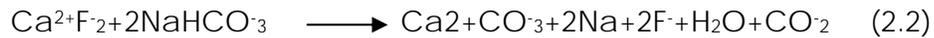
Las concentraciones de Flúor en el agua subterránea se asocian frecuentemente a la interacción agua-roca (Gizaw, 1996; Banks *et al.*, 1995; Dowgiallo, 2000; Carrillo Rivera *et al.*, 2002), pero también se han reportado casos donde la fuente es de origen antropogénico (Pertti and Backman, 1995; Kim and Jeong, 2005).

La Fluorita (Ca^{2+}F_2) es el mineral común de Flúor, es por tanto una importante fuente de éste, sin embargo, su solubilidad en agua es baja y muy lenta, y debido a que no es un mineral principal en las rocas, no es crucial como fuente de Flúor en el agua subterránea (Nordstrom and Jenne, 1977; Chae *et al.*, 2007).

El Flúor contenido en rocas ígneas y metamórficas principalmente, podría ser una fuente importante para el agua subterránea, ya que dicho ion puede originarse de la disolución de minerales accesorios de las rocas que los contienen como es el caso de las micas, anfíboles, cloritas, apatito y turmalinas, donde, de acuerdo con Brownslow (1996), el ión Flúor puede pasar a sustituir a los hidroxilo o viceversa, debido a la similitud de su radio iónico ($\text{F}^- = 1.23\text{-}1.36\text{Å}$; $\text{OH}^- = 1.37\text{-}1.40\text{Å}$).

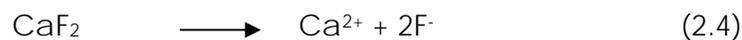
Resultados de un experimento de interacción agua-roca, realizado por Saxena and Ahmed (2001), indican que a temperatura normal, la conductividad eléctrica, pH, Ca^{2+} , y HCO_3^- son importantes en el agua subterránea donde, se disuelven minerales ricos en Flúor (sin existir una correlación directa entre fluoruro y CaHCO_3).

De acuerdo con los mismos autores, si el agua subterránea es rica en HCO_3^- , la siguiente reacción toma lugar durante la interacción agua-mineral (fluorita):



En las ecuaciones 2.1 y 2.2, se muestra la reacción donde el agua rica en NaHCO_3^- en una formación de roca erosionada acelera la disolución de CaF_2 , para liberar Flúor en el agua subterránea. En dicha reacción, la concentración de especies iónicas disueltas y el pH del agua, juegan un papel muy importante.

Los minerales ricos en calcita (CaCO_3) también favorecen la disociación de minerales ricos en Flúor, como se muestra en las siguientes reacciones (Sexena and Ahmend, 2001):



$$K = \{a(\text{HCO}_3^-)\} / \{a(\text{H}^+) \cdot a(\text{F}^-)^2\} \quad (2.5)$$

Donde **K** es la constante de equilibrio y **a** es la actividad. Si el pH es constante, la actividad del Flúor es directamente proporcional a la concentración de HCO_3^- . Esta relación es independiente del Ca^{2+} por la baja solubilidad producida de Ca^{2+}F_2 .

Los fluoruros y los iones OH^- son negativos y tienen casi el mismo tamaño iónico, por esto, en algunas reacciones químicas el fluoruro puede reemplazar al OH^- en minerales que constituyen principalmente a las rocas ígneas.

El transporte y transformación de fluoruro en el agua depende del pH, la dureza la temperatura y del intercambio catiónico. (Hem 1992).

Su gran dispersión explica su presencia en el agua y existe una relación entre el contenido fluoruro y el tipo de terreno por donde circula el agua. Hem (1992) indica que al hidrolizarse el Flúor influye en la alcalinidad del agua; asimismo, que el calcio limita la concentración del fluoruro

Investigaciones realizadas por Chae *et al.*, (2007), han encontrado que la biotita puede disolver hasta 6 mg/l de Flúor en 500 horas, dependiendo del tamaño del cristal, pues ésta contiene cantidades significantes de Flúor en su estructura y además posee una tasa de solubilidad bastante alta.

De acuerdo con el mismo autor, los minerales fosfatados como el apatito y fluorapatito también pueden ser una fuente de Flúor al agua subterránea, debido a su alto contenido de Flúor en su estructura cristalina; otra fuente pueden ser los minerales arcillosos como el caolín.

Los compuestos fluorurados más comunes en el agua son: fluoruro de magnesio (MgF_2), hexafluorosilicatos de sodio (F_6Na_2Si), ácido hexafluorosilícico (H_2SiF_6), disociado a la forma ácido silícico (H_2SiO_3), HF y Flúor, siempre que permanezcan a pH mayor a 5 (Urbansky and Schock 2000; Morris, 2004).

El Flúor también puede formar fuertes complejos con aluminio, boro, berilio, hierro, silicio, uranio y vanadio. Pero todos estos elementos no son comunes en el agua (Hem, 1985).

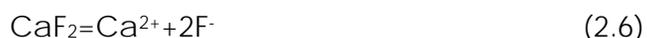
2.3.1 Flúor y pH del agua

Por su alta electronegatividad el Flúor, tiene una alta movilidad, y en un pH variable puede permanecer soluble tanto en ambientes de reducción, como de oxidación. Los minerales arcillosos que poseen cargas positivas, como el caolín, son capaces de detener iones Flúor en su superficie, pero a pH alto, pueden intercambiar iones Flúor por OH^- y entonces ser liberados al agua subterránea (Sreedevi *et al.*, 2006; Rafique *et al.*, 2009).

El contenido de Flúor en el agua subterránea se correlaciona positivamente con el Na^+ y el pH; a menudo, la ocurrencia de Flúor está asociada a un tipo de agua sodio-bicarbonatada con un pH alto, rara vez se ha detectado en agua con pH menor a 7.

El caso contrario es la correlación negativa que mantiene con el Ca^{2+} , esto indica, que la concentración Flúor está asociada a las reacciones donde el Na^+ y pH aumentan y el Ca^{2+} disminuye; como resultado de un intercambio catiónico, precipitación de calcita o bien, por las relaciones termodinámicas entre las actividades del Calcio y el Flúor. Evidenciando que indica que la concentración de Flúor es controlada por el equilibrio de la Fluorita (CaF_2), es decir, los límites del Flúor son determinados por el ión Calcio (Lee et al., 1997; Kim and Yun, 2005; Chae *et al.*, 2006 y 2007; Rafique *et al.*, 2009).

De acuerdo con Edmunds and Smedley (2005), en soluciones acuosas el límite superior de la actividad del Flúor está controlada por la solución de los productos, $K_{fluorita}$:



$$K_{fluorita} = (\text{Ca}^{2+}) \cdot (\text{F}^-)^2 = 10^{-10.57} \text{ a } 25^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

$$\log K_{fluorita} = (\text{Ca}^{2+}) + 2\log (\text{F}^-) = -10.57 \quad (2.8)$$

Esta es una importante relación porque demuestra que la concentración de Flúor es inversamente proporcional a la de Ca^{2+} .

El enriquecimiento de iones de Sodio y Flúor se debe a la disolución de silicatos, especialmente en fuentes que provienen de rocas alcalinas, donde la plagioclasa dominante es la oligoclasa, rica en sodio y deficientes en calcio (Hyndman, 1985; Raymond, 2002; Chae *et al.*, 2004). Con base en lo anterior, el Flúor puede ser removido por precipitación cuando se mantiene una alta concentración de Ca^{2+} (Chae *et al.*, 2007).

Resultados experimentales de Sexena and Ahmend (2001), indican que un medio alcalino de (pH = 7.6 a 8.6), alto contenido de HCO_3^- (entre 350 y 450 mg/L), con una conductividad moderada de (750 a 1750 $\mu\text{S}/\text{cm}$) son muy favorables para la disolución del Flúor (Sexena and Ahmend, 2001).

Por otro lado, también se ha documentado que las altas concentraciones de Flúor en el agua, se puede asociar a pozos profundos, causado por el incremento de la temperatura y tiempo de residencia que va ligado al incremento de la profundidad, lo que favorece la disolución del Flúor de los minerales en las rocas, hablando en términos termodinámicos, el

sistema llega al equilibrio con los minerales huéspedes de las rocas (Nordstrom *et al.*, 1989; Saxena and Ahmed, 2003; Chae *et al.*, 2006b).

El Flúor en el agua también puede provenir de fuentes hidrotermales que generalmente están enriquecidos en Flúor, así como de actividad geotermal. Los manantiales hidrotermales pueden contener hasta 1mg/l de Flúor (Ellis and Mahon, 1977; Nordstrom and Jenne, 1977).

2.4 El Flúor y la salud

La ingesta de cantidades moderadas de Flúor puede reducir la incidencia de caries dental y bajo ciertas condiciones, promover el desarrollo de huesos fuertes (Edmunds and Smedley, 2005). Considerando que el Flúor juega un papel importante en el desarrollo de los huesos, algunos médicos han inferido que la ingestión de este ión podría ayudar a prevenir la osteoporosis, bajo ciertos límites (Bernstein *et al.*, 1966).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO1994), el límite permisible de Flúor en el agua es de 1.5 mg/L, sin embargo, el presente estudio documenta, que en la región de Tenextepango el consumo de agua subterránea con contenido de fluoruro inferior a 1 mg/L, ya ocasionó problemas de fluorosis dental; como se señala en la figura 2.1, que muestra la curva dosis-respuesta para una población de Pakistan, (Maithani, 1998). Dicha curva indica la concentración en mg/L de fluoruros capaces de incidir en un porcentaje de la muestra estudiada; ahí mismo se indica la concentración mínima de incidencia en la zona de estudio. Es necesario señalar, que las dosis de fluoruro para producir respuestas en diferentes poblaciones pueden ser variables y están en función de diversos factores como son la edad de la población, el clima, la dieta alimentaria, y en parte la elevación con respecto al nivel medio del mar (Awadia *et al.*, 1999).

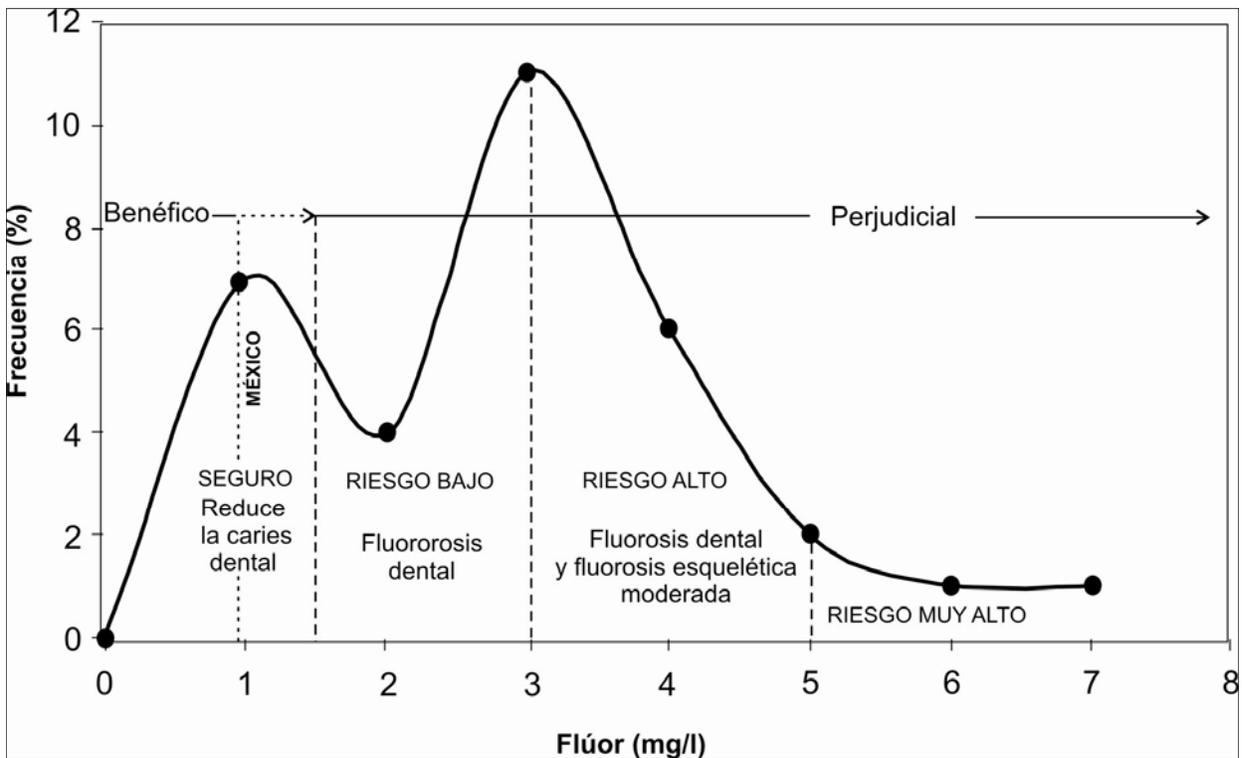


Fig. 2.1 Curva dosis-respuesta de los niveles aproximados de Fluoruro, necesarios para presentar diversas respuestas en el cuerpo humano, ante su ingesta (WHO, 1994; Maithani, 1998). Se ha incluido el contenido de fluoruro a partir del cual en vez de beneficio ocasiona fluorosis en la zona de estudio (México).

Dentro de los efectos adversos en la salud, debidos a la ingestión de sobredosis de Flúor, el principal y más común de los padecimientos es la fluorosis dental, que se manifiesta con la aparición de estriación horizontal en la superficie de los dientes o manchas opacas en el esmalte del diente que pueden ir de amarillentas a café, e incluso negras; eventualmente incrementa la porosidad del diente hasta provocar daños en su estructura, para finalmente picarse o astillarse (Rao, 2003).

Existe otro tipo de daños a la salud provocados por la ingesta de Flúor como es la fluorosis esquelética caracterizada por el incremento de masa y densidad en los huesos (Hileman, 1988; WHO, 1999; Rao, 2003; Edmunds and Smedley, 2005). En su estado más avanzado, la fluorosis esquelética produce efectos neurológicos, debilidad y parálisis en los músculos, deformidades paralizantes de la espina y compresión del nervio espinal. En general, no existen evidencias de que concentraciones menores de 4 mg/L sean causantes de este

padecimiento, en la figura 2.1 se puede observar la curva dosis-respuesta de los niveles aproximados de Flúor necesarios para presentar esta enfermedad.

En experimentos realizados con animales, se encontró que existe una relación entre ingestión de Flúor y la función reproductiva (Doull *et al.* 2006). Al respecto, estudios realizados por Freni (1994), muestran que un alto contenido de fluoruros en el agua, puede causar decremento en la tasa de natalidad, debido a que puede influir en la movilidad de los espermatozoides y en los niveles de testosterona.

En cuanto a los efectos en el desarrollo, algunas investigaciones de Gupta *et al.* (1993) y Malhotra *et al.* (1993), encuentran que existe una correlación positiva entre concentraciones de fluoruros y el cordón umbilical, lo que sugiere que la placenta permite la difusión pasiva de Flúor de madre a feto. Asimismo existen otras investigaciones que señalan que puede haber alguna relación entre ingestión de Flúor y prevalencia de síndrome de Down, especialmente en niños nacidos de madres menores de 30 años (Takahashi, 1998; Whiting *et al.*, 2001).

En China, Li *et al.* (1995) y Wang *et al.* (2007), documentan que la ingestión de fluoruro impacta a la inteligencia de la población infantil; Calderón *et al.* (2000), sugieren que el fluoruro podría afectar tiempos de reacción y habilidades viso espaciales, las cuales se manifiestan como un bajo IQ.

Entre otros padecimientos se encuentran los efectos endócrinos, que consisten principalmente en secuelas en la función de la tiroides; o bien los padecimientos gastrointestinales, entre los cuales se encuentran náuseas, vómito, diarrea, dolor abdominal, debido a intoxicación por Flúor. También estudios realizados en animales revelan que el Flúor puede estimular la secreción del ácido gástrico y causar la muerte de células epiteliales del tracto gastrointestinal (Dull *et al.*, 2006).

En cuanto al cáncer, aún es difícil establecer claramente las causas, ya que existen infinidad de factores que favorecen este padecimiento, además de que se manifiesta años después del contacto continuo, sin embargo, de acuerdo con Ozsvath (2009), estudios epidemiológicos han identificado como factor carcinógeno a la exposición crónica de Flúor, y se puede manifestar como cáncer en los huesos, en riñones, colon y vejiga, esto, debido a la ingesta vía agua (Grandjean *et al.*, 1990; 1992).

En cuanto a la exposición por enriquecimiento antropogénico de Flúor, puede manifestarse en cáncer de pulmón y de vejiga (Grandjean, 1992). También puede conducir a bronquitis crónica, enfisema y asma (Soyseth *et al.*, 1994; Romundstad *et al.*, 2000).

Por otra parte como resultado de una ingesta deficiente de Flúor, se presenta un aumento en la incidencia y severidad de caries dental. La fuente más importante de fluoruro en la dieta humana es el agua de consumo y de menor importancia en vegetales (arroz y cebada), frutas, carnes y pescado (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Algunos de los alimentos que contienen fluoruros (tomado de Fawell, *et al.*, 2006).

Alimento	Concentración de Flúor (mg/Kg)
Productos lácteos	0.01-0.8
Carnes y avícolas	0.04-1.7
Pescado (según variedad)	0.21-4.57
Panes y cereales	0.04-1.85
Vegetales	0.01-0.4
Frutas	0.01-0.04
Grasas y aceites	0.05-0.13
Azúcares y dulces	0.01-0.28
Bebidas (cerveza, vino, café)	0.21-0.96
Té	4.97

2.5 Daños a la salud en Tenextepango, Cuautla

En el área de Tenextepango se han presentado casos de fluorosis dental. Odontólogos especializados examinaron una población de 436 escolares con una edad promedio de 9.5 años (\pm 1.63). La proporción de niños en las categorías moderada y severa varió del 11.9% al 28%, ésta última prevalencia corresponde a una zona con mayor concentración de Flúor en el agua (Muñiz Ramírez, *et al.* 2009). El grado de afectación se puede observar en la figura 2.2 a y b.



a



b

Fig. 2.2. Casos de fluorosis dental incipiente avanzada (a) y severa (b) en la zona de Tenextepango, Cuautla.

III. MARCO FÍSICO

3.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio está ubicada al sur de la Ciudad de Cuautla, en la porción sureste del estado, delimitada por las coordenadas geográficas: $18^{\circ}47'04''$ y $18^{\circ}33'00''$; Latitud Norte y $98^{\circ}49'03''$, $99^{\circ}04'07''$, Longitud Oeste. Tiene una superficie de 328.860 Km², Figura 3.1.

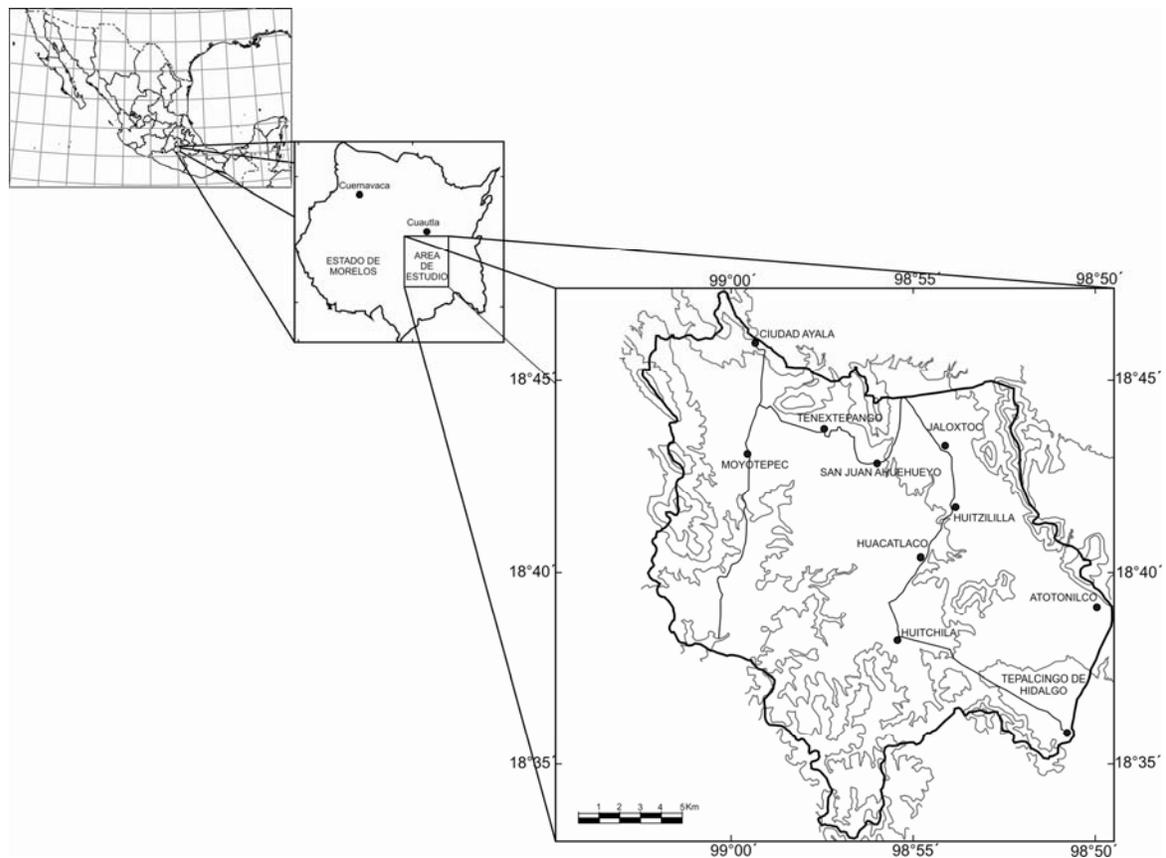


Fig. 3.1 Ubicación geográfica del área de Tenextepango, Cuautla, Morelos

3.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN

El acceso al área que interesa, se logra a través de la Autopista México-Cuernavaca tomando la desviación hacia el poblado de Tepoztlán, donde inicia la carretera federal México-Cuautla de cuota (115). Una vez en Cuautla, se continúa por la carretera federal (160), México-Acatlán-Oaxaca, desviándose en el poblado de Tlayecac en dirección de la población de Jaloxtoc-Ahuehuevo-Tenextepango.

Desde Cuautla se puede llegar por medio de la carretera vecinal Cuautla-Chinameca, pasando por la Ciudad de Ayala.

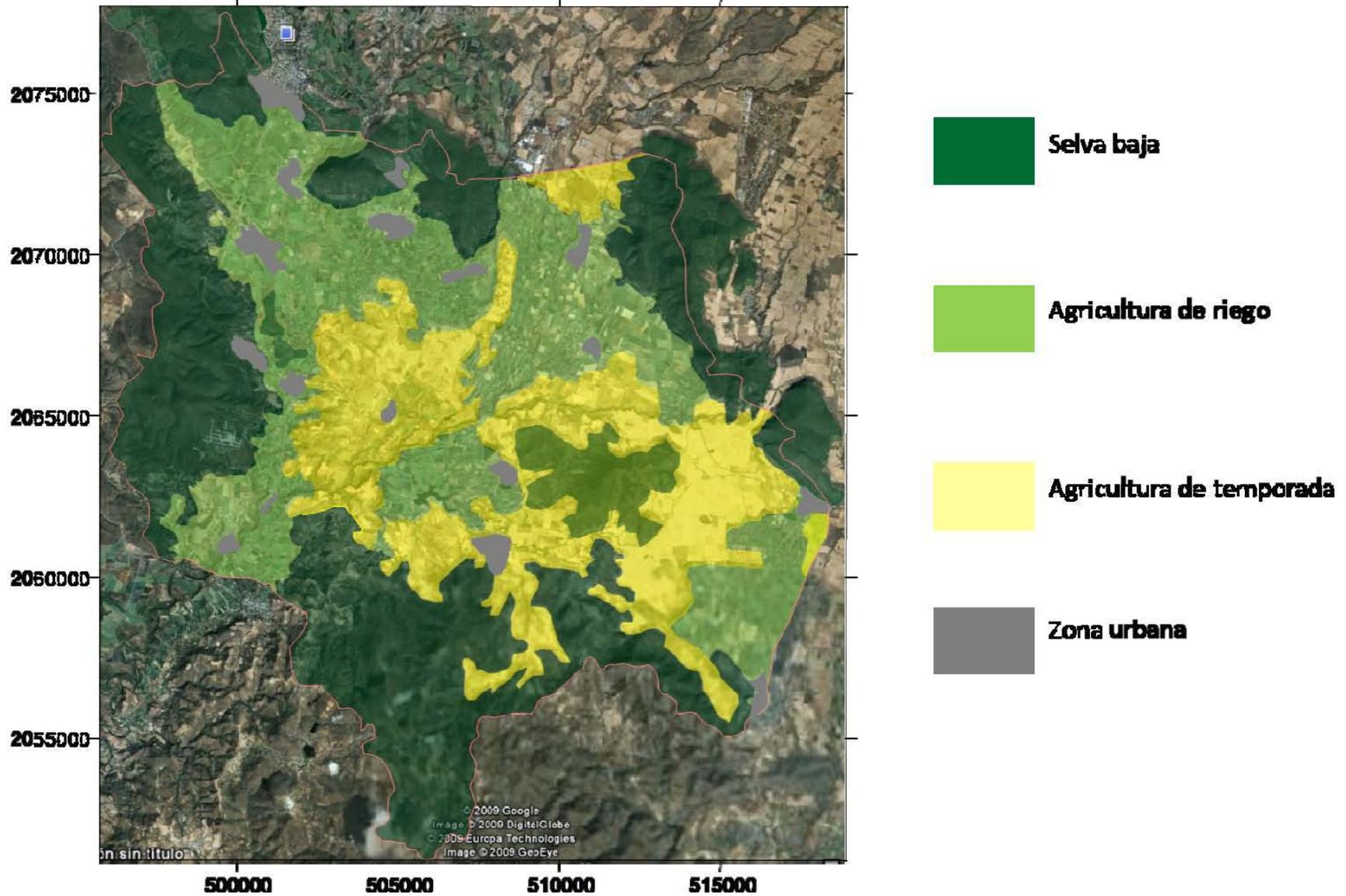
Internamente existen varios caminos vecinales pavimentados y terracería que comunican a las diferentes poblaciones existentes dentro del área de estudio (INEGI, 2005).

3.3 USO DEL SUELO

Las actividades económicas de la región de Tenextepango son: la agricultura y servicios. La primera es la principal actividad en la zona y ocupa aproximadamente el 50 % de la superficie, de este porcentaje, el 35% corresponde a agricultura de riego, y el 15% a cultivos de temporal. La agricultura incluye como principal cultivo la caña de azúcar, arroz, después se produce maíz, frijol, calabacita, papa, cebada, cacahuete, sandía, soya, chile, ejote, avena y trigo (Valencia-Díaz y Carrasco-Carnadillo, 2006).

De acuerdo con INEGI (2005), el 50% de superficie restante corresponde al uso de suelo forestal, representado por la vegetación de selva baja caducifolia con árboles de altura media (menos de 12 m) y bosque sub-inerme y pastizal (Mapa 1).

El pastizal inducido abunda en menor proporción respecto a los demás usos de suelo, su explotación es extensiva y sirve de alimento para el ganado vacuno (pastoreo). Sus elementos dominantes son: el zacate, grama negra, navajita, zacatón, pasto, entre otros (INEGI, 2005; Valencia-Díaz y Carrasco-Carnadillo, 2006).



Mapa 1. Usos de suelos en Tenextepango, Cuautla.

3.4 GEOMORFOLOGÍA DE LA REGIÓN DE TENEXTEPANGO

Las formas del relieve son la expresión en superficie de estructuras geológicas, formadas durante eventos geológicos regionales, que para el caso del área de estudio, ocurrieron durante el Cretácico, el Terciario y el Cuaternario; no obstante, algunas de esas estructuras aún están activas.

De acuerdo con Lugo-Hubp (1993), el relieve es el resultado de la interacción de dos procesos: el endógeno, y el exógeno, representados principalmente por el régimen tectónico y la acción del clima respectivamente, factores que se encuentran estrechamente relacionados.

En el área de estudio, se reconocieron seis tipos de relieves que fueron clasificados tres dentro del relieve endógeno y tres en el exógeno (Mapa 2).

3.4.1 RELIEVE ENDÓGENO

Dentro de esta forma de relieve se considera: el relieve tectónico modelado, volcánico modelado y plicativo modelado (Demek *et al.*, 1972; Lugo-Hubp, 1988); a continuación se explica brevemente cada uno de ellos y se muestran en el Mapa 2.

3.4.1.1 Relieve Tectónico Modelado

Este relieve fue reconocido en el extremo este del área de interés, representado por geoformas angulosas, compuestas de rocas cristalinas, metamórficas y cuerpos intrusivos. Aquí están las mayores elevaciones del área de estudio, como es el cerro Jumilar con una altura de 300 m sobre la planicie. Este relieve está emplazado en dirección NW-SE, debido a la amplitud de los cuerpos intrusivos, su morfología de forma alargada se ensancha en el norte y se adelgaza en el sur. Asimismo, presenta límites lineales a ambos lados este y oeste, que permite pensar que en su lado oeste está delimitado por una posible falla. Tiene laderas muy inclinadas y cortas, en ocasiones existen algunos escarpes como el que se

encuentra en frente de Huitzililla. Las cimas de este relieve son agudas; cortados por un drenaje de tipo paralelo y rectangular con laderas cortas (Mapa 2).

3.4.1.2 Relieve Volcánico Modelado

Este relieve se ubica al centro y sur del área estudio. En la zona centro corresponde a relieve de colinas y una serie de lomas de corta longitud y de superficie suave, cortadas por la disección de drenajes paralelos de hasta 30 m de profundidad orientada del NW al SE. En conjunto estas lomas forman una geoforma alargada de SW a NE. La pendiente de estas lomas en general es moderada llegando a formar escarpes en el lado noroeste (Mapa 2).

En la porción sur del área, el relieve está representado por un conjunto de pequeñas sierras alargadas y dispuestas en direcciones N – S y NW-SE, con una altura aproximada de 250 m respecto a la planicie, separadas por valles estrechos poco profundos, formados por el proceso erosivo-fluvial, ubicadas entre los poblados de Chinameca y Tepalcingo de Hidalgo. Estas geoformas tienen laderas cortas poco erosionadas; la mayoría de las laderas presenta escarpes que corresponden a fracturas alineadas NW-SE en su mayoría. La cima de este relieve es casi plano o de forma angulosa, en parte esto se debe a que se trata de derrames de lava regularmente erosionados, delimitados por angostos valles desarrollados sobre fracturas, mismas que favorecen el desarrollo de un drenaje de tipo paralelo, rectangular y subdendrítico.

3.4.1.3 Relieve Plicativo Modelado

Se trata de relieves alargados que corresponden a plegamientos de 350 m de altura con respecto a la planicie de Tenextepango, representados por sinclinales y anticlinales dispuestos en dirección NW-SE; la morfología de los anticlinales forma sierras pequeñas de cimas redondeadas y pendientes suaves; en algunos lugares se observan pequeños escarpes originados por la erosión y en otros por la presencia de fracturas o fallas. Estos relieves compuestos por rocas calizas están separados por valles angostos.

Al este de la Ciudad de Ayala está el cerro El Olinche cuya topografía alargada y redondeada corresponde a un sinclinal formado por caliza, dispuesto en dirección NW-SE. Al norte de San Juan Ahuehuevo se encuentran geoformas de tipo cóncavo, de constitución calcárea; debido a la permeabilidad de estas rocas es notable la ausencia de drenaje superficial y habitual la presencia de formas kársticas, como lapiaz y microdolinas, como se observa en los cerros El Aguacate, El Gallo y Olinche, no obstante en muchos de estos relieves se aprecian drenajes paralelo, subdendrítico y asimétrico (Mapa 2).

3.4.2 RELIEVE EXÓGENO

Dentro de este tipo de relieve se clasificaron: relieve acumulativo aluvial, relieve erosivo y relieve fluvial, todos ellos se muestran en el Mapa 2, elaborado a partir de las observaciones hechas en campo. Estos relieves delimitan una planicie cuya topografía desciende suavemente de noroeste a sureste, de 1500 a 1200 msnm.

3.4.2.1 Relieve acumulativo aluvial

Esta forma de relieve fue originada por procesos fluvial y proluvial, que depositaron gruesos espesores de sedimentos de rocas volcánicas y calcáreas, procedente de las elevaciones circundantes. En la parte NW-W de la planicie, encontramos aluvión de composición calcárea; en la zona centro y sur, existe acumulación de clastos volcánicos polimígticos y heterométricos; hacia el NE predominan los aluviones y coluviones volcánicos polimígticos en ocasiones cubiertos de brecha basáltica. En el oriente destaca la abundancia de lahares, mientras que al SE, la planicie está constituida por una combinación de volcanoclásticos y clastos de caliza.

La planicie está drenada por barrancos de profundidad variable, lo que indica que la zona está sujeta a un levantamiento tectónico que propicia la fase erosiva de la planicie. Todos estos cauces presentan tramos rectos de orientación principalmente E-W y NE-SW que definen un drenaje controlado por fracturas y/o fallas, tres de los barrancos más notables son: Barranca la Cuera, Barranca Cuautla (Río Cuautla) y Barranca Seca. La planicie tiene

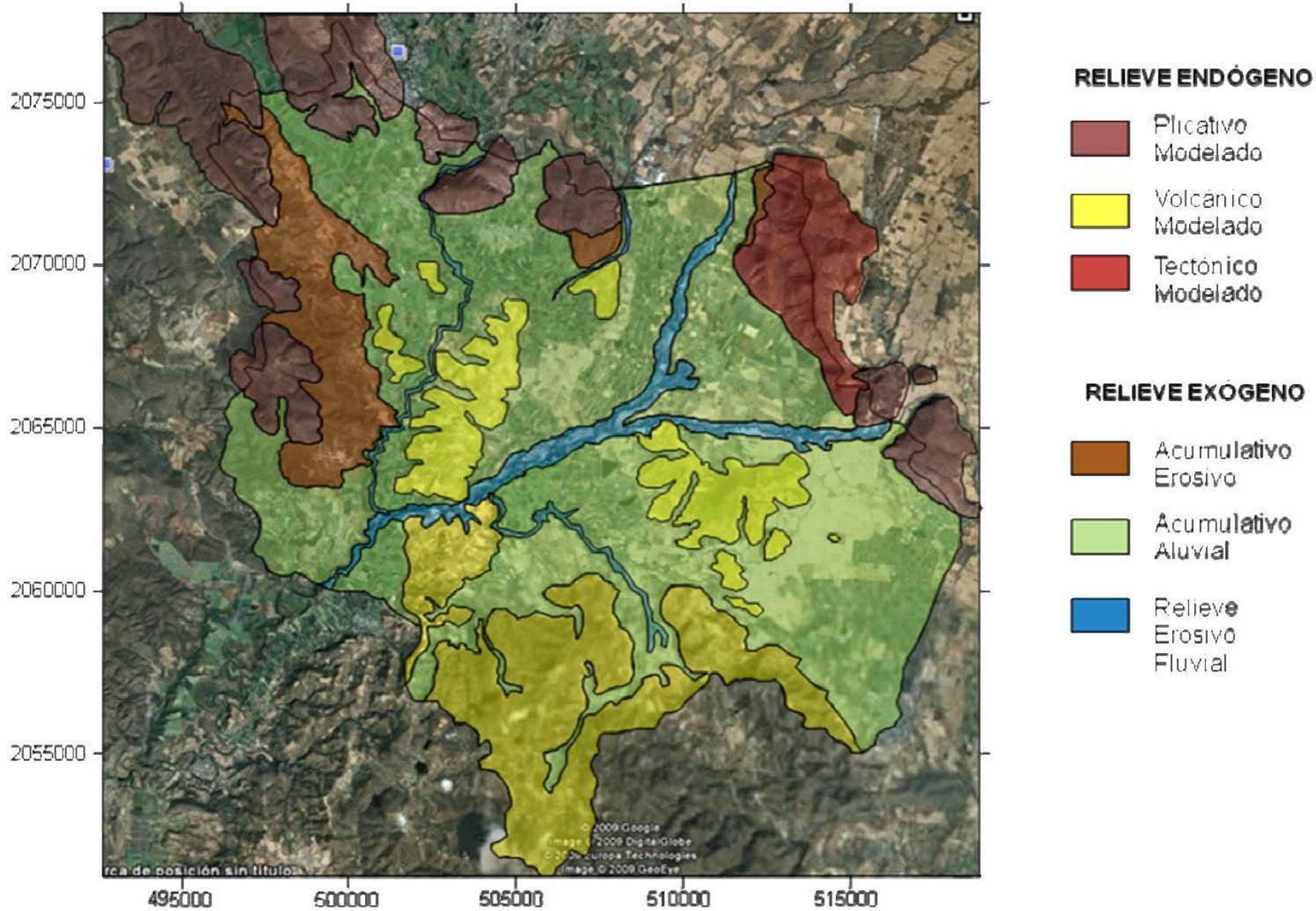
forma de un polígono irregular con límites muy rectos, esto permite deducir que los relieves que la delimitan están controlados por estructuras tectónicas (Mapa 2).

3.4.2.2 Relieve acumulativo erosivo

Representado por una morfología de lomas alargadas, de cimas redondas, y montículos, ubicado en la parte oeste centro y este de la planicie, formando el piedemonte, y también parte de la planicie; en su origen este relieve fue un gran evento de depósito de conglomerado poco consolidado, constituido de fragmentos de caliza, yesos y algunos volcánicos que hoy en día está siendo erosionado nuevamente a través del desarrollo de cortos pero profundos barrancos, dispuestos en drenaje paralelo asimétrico.

3.4.2.3 Relieve erosivo fluvial

Representado por los diferentes cauces perennes y de temporal que drenan de las zonas altas y convergen en la planicie a los cauces principales, sobresaliendo los barrancos de río Cuautla, La Cuera y Seca, que cruzan la planicie en direcciones N-S; NE-SW; E-W, respectivamente. La planicie es disecada por estos barrancos de profundidad variable, lo angosto de sus cauces es producto de una erosión vertical importante, permite decir que la zona está sujeta a un levantamiento tectónico que propicia la fase erosiva de la planicie.



Mapa 2. Geomorfología de la región de Tenextepango, Cuautla.

3.5 HIDROCLIMATOLOGÍA

Para conocer las características hidroclimatológicas de la cuenca se tomaron en cuenta los siguientes factores: precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración e hidrología.

Se utilizó información de 8 estaciones meteorológicas localizadas dentro del área de estudio y en sus cercanías. Las estaciones consideradas son las siguientes:

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. Cuautla | 5. Tepalcingo |
| 2. El Limón | 6. Ticumán |
| 3. Jonacatepec | 7. Tlacotepec |
| 4. Temilpa | 8. Valle de Vázquez |

3.5.1 Precipitación

En base al análisis de los datos de las estaciones meteorológicas, la precipitación media anual que incide en el área de interés se encuentra en un intervalo de 863.74 mm a 1063.63 mm por año, dando un promedio anual de 869.81 mm. El promedio anual de cada estación se muestra en la (Tabla 3.1 y Gráfica 3.1).

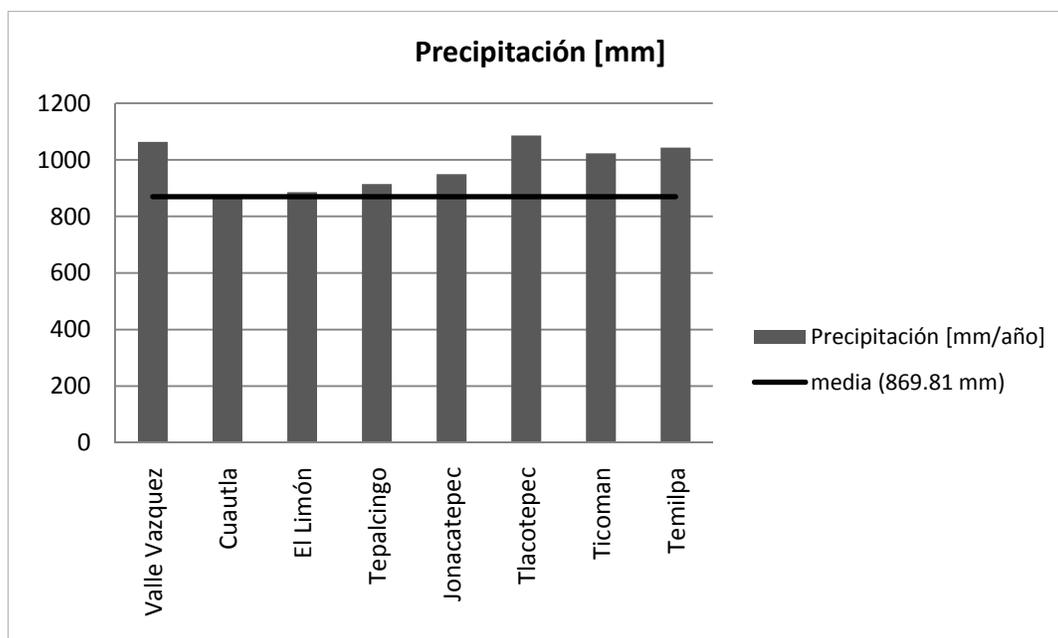
Tabla 3.1 Promedio anual de lluvia, obtenido de los datos diarios proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA.

Estación	Precipitación [mm]	Periodo
Valle Vazquez	1063.63	2001-2004
Cuautla	863.74	1994-2005
El Limón	885.52	1996-2000
Tepalcingo	914.13	1996-2002
Jonacatepec	949.21	1994-2006
Tlacotepec	1085.85	1994-2006
Ticomán	1022.78	1994-2004
Temilpa	1043.44	1996-2004

Promedio anual:	869.81
-----------------	--------

De acuerdo con la gráfica 3.1, la lluvia es más abundante en las inmediaciones del área de estudio, como lo indican los valores de la gráfica, esto manifiesta ciertas condiciones de microclimas determinado quizá por las elevaciones que aunque pequeñas, rodean la planicie de Tenextepango. Aunque para confirmar tal idea será necesario que haya estaciones meteorológicas dentro del área de interés, pues únicamente existe una.

Gráfica 3.1 Cantidad de precipitación media anual para cada estación meteorológica y precipitación media para toda la zona de estudio.



En la gráfica 3.1 y figura 3.2, se aprecia que la mayor cantidad de lluvia durante el año se registra en las estaciones: Valle Vázquez, Tlacotepec y Temilpa, ubicada al suroeste, noreste y oeste, respectivamente. Por otra parte, la distribución anual de los datos de lluvia, indica que el régimen pluvial es el mismo que en la mayor parte de México, esto es, la lluvia ocurre en el verano; a partir del mes de mayo y concluye en septiembre-octubre.

3.5.2 Temperatura

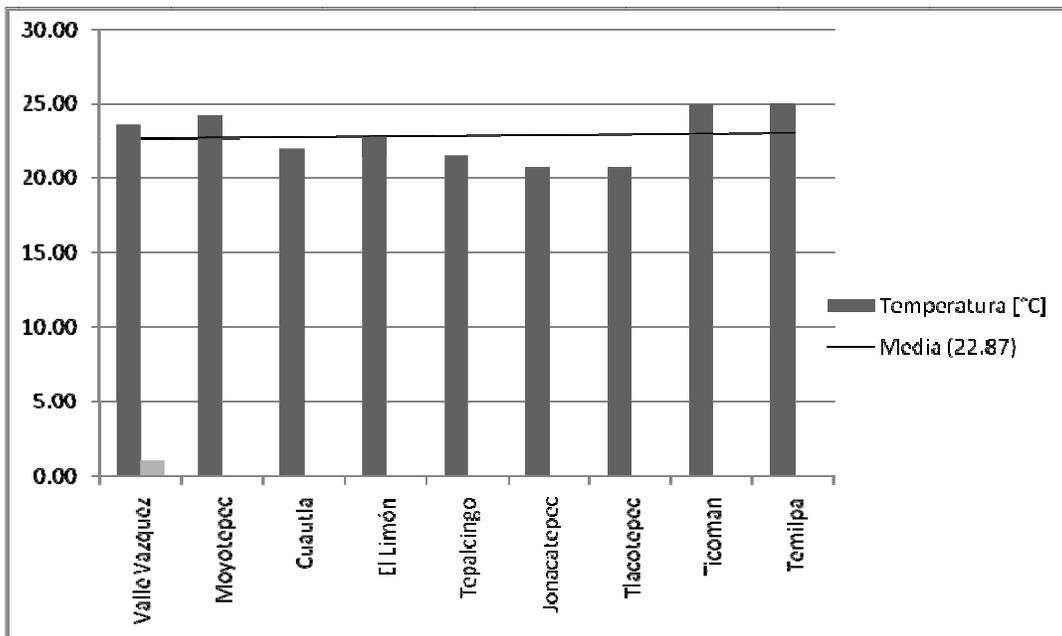
La temperatura media anual se obtuvo a partir de los datos diarios máximos y mínimos de 9 estaciones meteorológicas (Tabla 3.2, Gráfica 3.2), en ellas se observa que la mayor temperatura se presenta en la parte oeste, en las estaciones Ticoman, Temilpa y

Moyotepec con 25°C, esto manifiesta que a partir de las laderas del volcán Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, conforme uno se aleja de ellas la temperatura se incrementa.

Tabla 3.2 Temperatura media anual obtenida a partir de datos diarios de temperatura proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA.

Estación	Temperatura [°C]	Periodo (años)
Valle Vázquez	23.68	2001-2004
Moyotepec	24.27	1994-2005
Cuautla	22.04	1994-2006
El Limón	22.84	1996-2000
Tepalcingo	21.48	1996-2000
Jonacatepec	20.76	1994-2007
Tlacotepec	20.79	1994-2007
Ticomán	24.97	1994-2004
Temilpa	25.03	1996-2004

Gráfica 3.2 Valor de la temperatura media anual en la zona de Tenextepango



3.5.3 Clima

En base a los resultados obtenidos de las estaciones meteorológicas y de acuerdo con la carta de climas de García (1997), en la zona de estudio existen 2 tipos de climas: el Awo(w)(i´)g y el (A)C(w1)(w)ig. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos y en la figura 3.2 se muestra su distribución dentro del área de estudio.

3.5.3.1 Awo(w)(i´)g

Es un clima subhúmedo muy cálido con temperatura media anual arriba de los 22°C, (Awo), cálido todo el año, con poca oscilación anual entre las temperaturas mensuales, que pueden variar entre 5 y 7°C (i´), el mes más caliente se presenta antes de junio (g).

3.5.3.2 (A)C(w1)(w)ig

Se encuentra dentro de los climas subhúmedos, es un clima semicálido con temperatura anual entre 18 y 22°C ([A]; C), donde la temperatura media del mes más frío siempre es mayor a los 18°C ([w1][w]), existe poca oscilación anual entre las temperaturas mensuales, que pueden variar entre 5 y 7°C (i´), el mes mas caliente se presenta antes de junio (g).

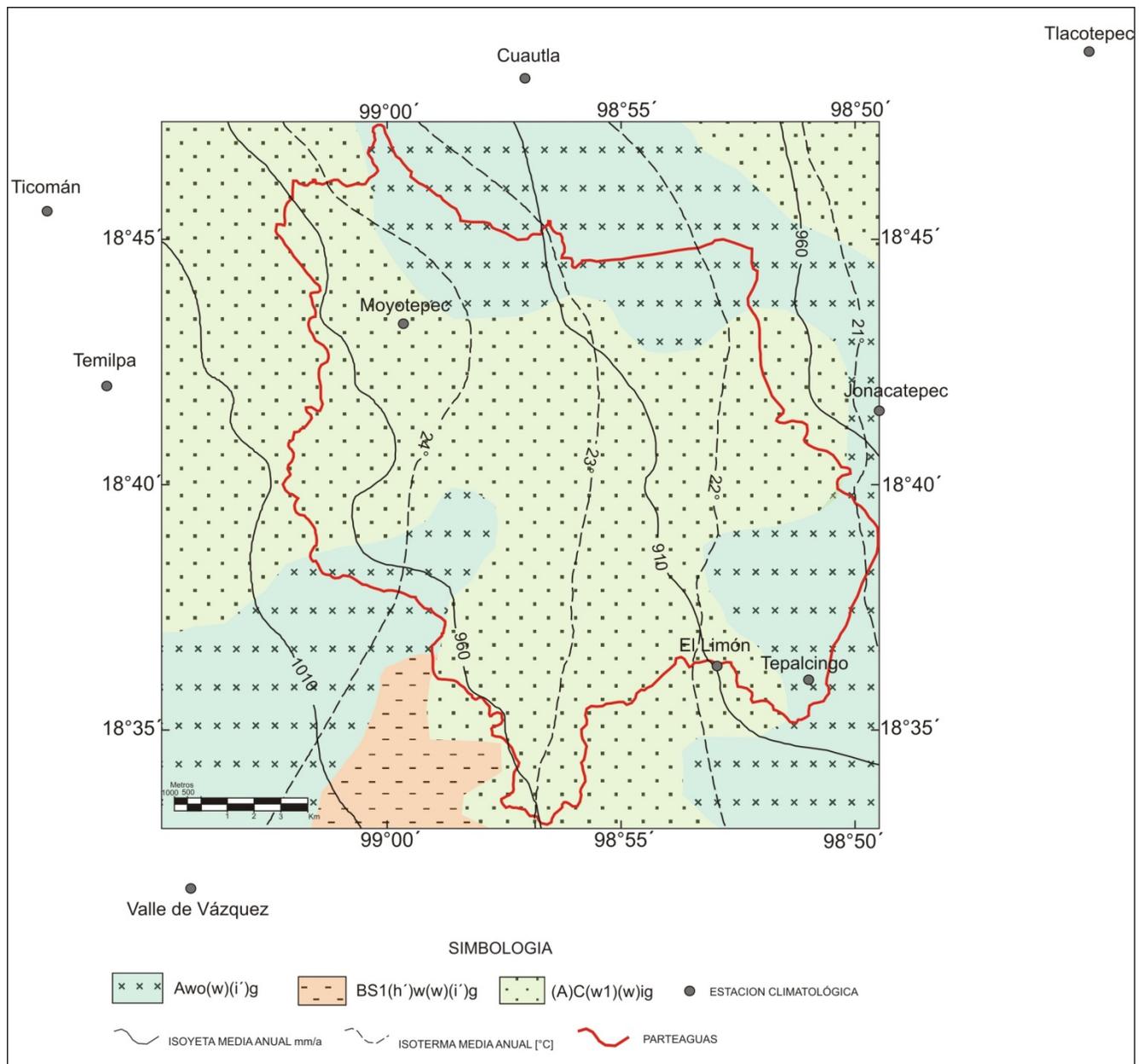


Fig. 3.2 Distribución de los diferentes climas en la planicie de Tenextepango, Cuautla Morelos. Fuente García (1997), con modificaciones del autor.

3.5.4 Evapotranspiración

Una gran parte del agua que llega a la superficie del suelo, regresa a la atmósfera en forma de vapor, directamente por evaporación o, a través de la transpiración de las plantas y animales. La influencia de estos fenómenos sobre el ciclo hidrológico es evidente,

si se considera que en muchos lugares del mundo, entre el 70 y el 90% de la precipitación regresa a la atmósfera por evapotranspiración (Hamon, 1966).

Para ésta investigación se aplicó el método de Turc (1955) para calcular la evapotranspiración real anual, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas proporcionados por CONAGUA, los resultados obtenidos se presentan en la (Tabla 3.3).

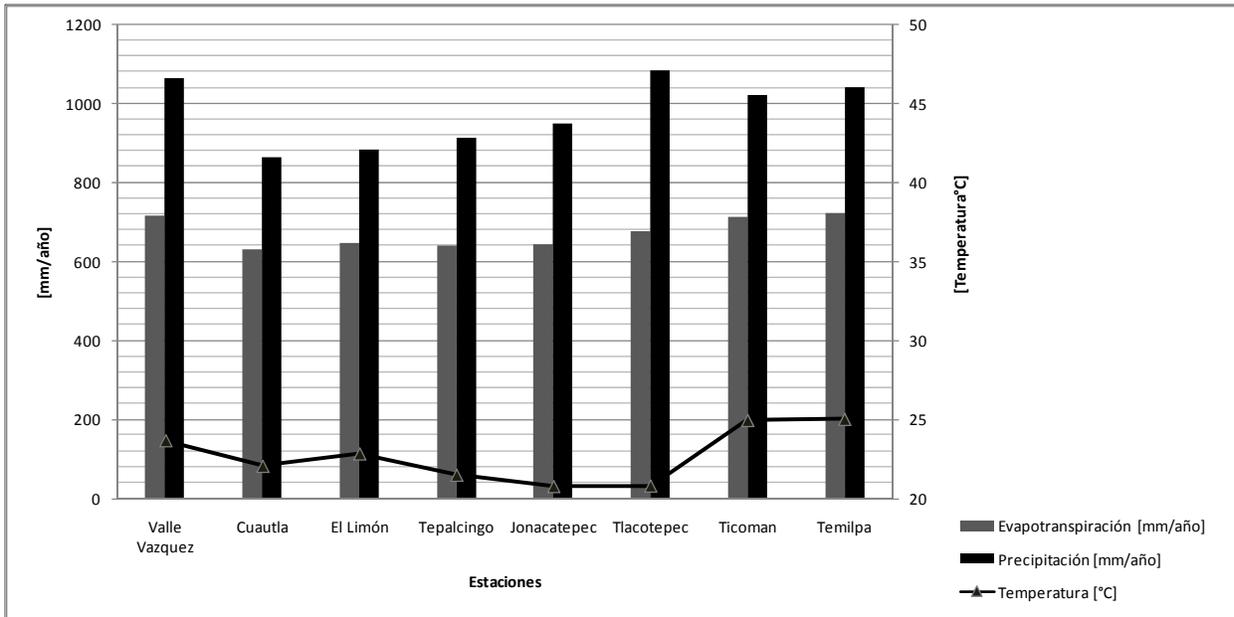
Tabla 3.3 Evapotranspiración media anual.

Estación	Evapotranspiración [mm/año]
Valle Vazquez	715.17
Cuautla	630.58
El Limón	646.78
Tepalcingo	641.61
Jonacatepec	643.34
Tlacotepec	677.59
Ticomán	715.06
Temilpa	722.04

La gráfica 3.3, contiene la temperatura media anual y la proporción existente entre la evapotranspiración y la precipitación, y se observa que en todas las estaciones la evapotranspiración siempre es menor a la precipitación media anual (869.81 mm/año). Los valores de evaporación varían entre 630 y 722 mm/año, que corresponde al 62 y 73% de humedad que regresa a la atmósfera. De ello se deduce que el porcentaje restante puede formar escurrimiento e infiltración, aunque esto último no siempre significa que sea recarga para el acuífero.

Finalmente, se puede decir que el porcentaje de evapotranspiración en esta zona es bastante alto en correspondencia con la temperatura promedio que aquí existe; que como ya se mencionó en el apartado anterior (3.5.3), se trata de una región con climas cálidos y subcálidos.

Gráfica 3.3 Climograma que compara los valores de evapotranspiración (a) y de precipitación (b) por estación meteorológica y como un atributo más la temperatura media anual (c) en la región de Tenextepango.



3.5.5 Hidrografía

La hidrografía de esta parte de la subcuenca del río Cuautla (Figura 3.3) está conformada por escurrimiento de temporal, escurrimientos perennes cuyo flujo base es alimentado por manantiales y canales, una presa y varios bordos (jagüeyes), así como varias piscinas para criar peces.

El río principal de esta zona es el Río Cuautla, que fluye de NE a SW, es un río perenne a partir de la zona de descarga (manantiales) de los Sabinos, el caudal se incrementa con el aporte del manantial Agua Hedionda y después con el agua residual del área urbana de la ciudad de Cuautla y alrededor. Una parte del agua de este río se emplea para riego en la zona de Tenextepango, el resto sigue hasta a su confluencia con el Río Amacuzac del cual es afluente. El cuadrante noroeste de la zona de estudio, se caracteriza por tener escurrimientos torrenciales que son afluentes del río Cuautla y que drenan los relieves calcáreos de las Formaciones Morelos y Cuautla.

En la parte centro –este, existen dos drenes principales; Barranca San Juan y Barranca la Cuera, el primero fluye de norte sur y cambia a este- oeste para llegar al Río Cuautla, el

segundo atraviesa la planicie en dirección NE-SW, en el fluye un ínfimo caudal de agua durante el año, siendo importante su caudal solo en época húmeda, este es un afluente del río Cuautla, al cual confluye a la altura del manantial Tecomalco.

El río Barranca Seca, que se ubica un poco más al sur del anterior, tiene un escurrimiento de tipo torrencial y confluye a la Barranca Seca. Este cauce recibe los drenes de la sierra de Xalostoc y el Organal, y caudales que proceden de la zona de Jonacatepec, fuera de la zona de interés.

En el sector sur existe una gran cantidad de escurrimientos intermitentes que forman las *subcuencas* de los ríos Barranca Molotlán y Barranca los Toros, el primero confluye a su vez con Barranca la Tinaja y juntos desaguan en la presa Francisco Leyva. Aguas abajo de la cortina de esa presa, el río confluye con el de Barranca los Toros, se unen al Barranca la Cuera, para luego confluir al río Cuautla.

Lamentablemente, no existen estaciones hidrométricas que indiquen el volumen del escurrimiento superficial, por esta razón no se sabe el volumen anual de aguas superficial.

En el área existen varios canales que conducen una mezcla de agua residual y agua limpia de manantial para irrigar una gran parte, y algunas piscinas criaderos de peces. Dichos canales son: La Cuera, Iguanas, Tunel, Tortugas, San Esteban, Molino, Torre, Axocoche y Agua Hedionda. El volumen de agua empleado anualmente para riego a través de esos canales se indica en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Volumen anual de los canales de la zona de Tenextepango, Cuautla.

Canal	Volúmenes anual en [m³]
Bca. La Cuera	4226.5
Las Iguanas	26824.7
El Tunel	22671.0
Las Tortugas	10371.7
San Esteban	29531.6
El Molino	5174.3
La Torre	9405.8
Volumen Total	108205.4

Es importante destacar el aporte de agua subterránea que en esta zona se manifiesta por algunos manantiales, cuya descarga a lo largo del año aumentan o disminuyen

sensiblemente. El agua de los manantiales, se utiliza principalmente para el consumo de la población que vive en las inmediaciones de ellos, otra parte se usa para riego. Como es el caso del agua de los manantiales Axocoche y Atotonilco, este último es un manantial termal. En la figura 3.3, se observa la ubicación de los distintos manantiales.

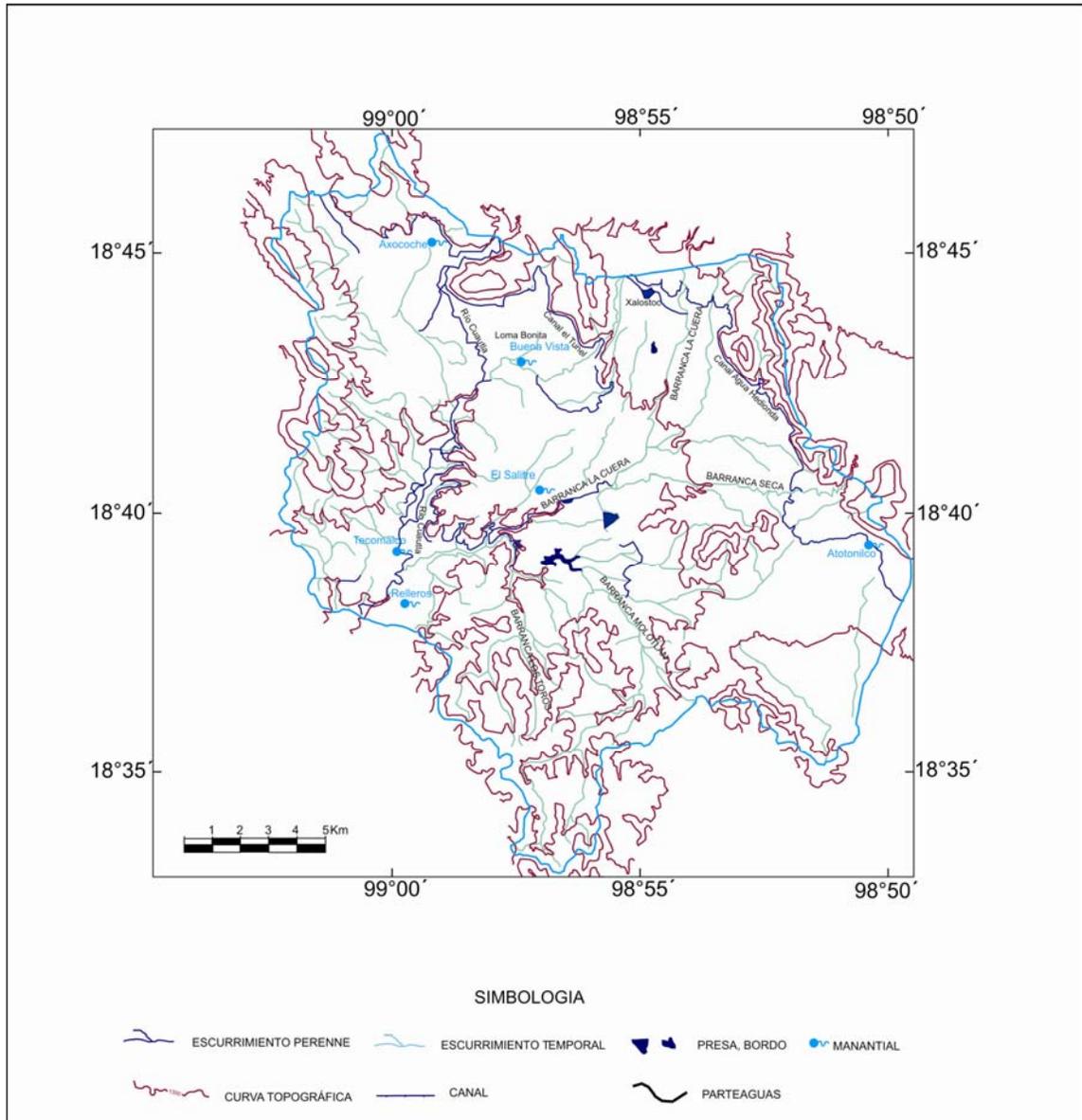


Fig. 3.3 Hidrografía de la zona de Tenextepango.

IV. MARCO GEOLÓGICO

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

En el estado de Morelos están presentes dos provincias referidas desde un punto de vista tectonoestratigráfico: la plataforma Morelos-Guerrero y el Cinturón Volcánico Transmexicano.

La primera consiste en depósitos marinos cretácicos, de carácter carbonatados y depósitos clásticos terciarios; mientras que el segundo es de carácter exclusivamente continental y primordialmente ígneo extrusivo del Cenozoico (Ortega-Gutiérrez, F. 1978a)..

El área objeto del presente estudio está ubicada en la parte centro-sureste del estado de Morelos (Figura 1.1) y es parte de la Plataforma Morelos-Guerrero.

4.1.1 Plataforma Morelos-Guerrero

La plataforma Morelos-Guerrero está caracterizada por una sucesión sedimentaria marina que tiene extensos afloramientos en los estados de Morelos y Guerrero. La columna estratigráfica está compuesta principalmente de una delgada sucesión de calizas marinas (Formaciones Morelos y Cuautla) que subyacen a los clastos calcáreos de la Formación Mexcala del Turoniano-Mastritchiano (Fries, 1960; Hernández-Romano, 1995; Aguilera-Franco, 1995). Para datar la plataforma Morelos-Guerrero, Aguilera-Franco (2003), se basó en una combinación bioestratigráfica de foraminíferos planctónicos y bentónicos, obteniéndose así, edades del Cenomaniano-Conienciano.

Las rocas marinas de esta región se encuentran en discordancia, cubiertas por depósitos clásticos continentales terciarios del Grupo Balsas y rocas volcánicas también del terciario del Grupo Ixtlilco (Fries, 1960).

De acuerdo con Fries (1960) y Ortega-Gutiérrez (comunicación personal), la plataforma Morelos-Guerrero, constituye un elemento estratigráfico que limita tres terrenos de basamento cuyos límites están ocultos debajo de ella.

Asimismo, no se ha identificado el propio basamento de ésta, excepto de manera ambigua en sus márgenes, que por lo general son zonas de fallamiento regional, y las relaciones estratigráficas aún no se han aclarado por completo. Estos márgenes son la meridional donde la Formación Chapolapa está expuesta subyaciendo a la Formación Morelos, y sobreyace al Complejo Acatlán, en este sentido el Complejo Acatlán podría constituir el basamento de la plataforma, sin embargo, considerando que la Fm Chapolapa forma parte del Esquisto Taxco de edad Jurasico Temprano-Triásico (Sedlock *et al.*, 1993), entonces el basamento de las rocas cretácicas de esta parte de la plataforma deberá ser ese esquisto, tema que queda fuera del objetivo del presente estudio.

El complejo Acatlán es el miembro más antiguo del terreno Mixteco, el cual ha sido dividido en dos subgrupos el Petlalcingo en la base y, el Acateco y la Formación Tecomate en la cima (Ortega-Gutiérrez, 1978a, 1981a, b).

El Esquisto Taxco forma parte del Complejo Tierra Caliente que incluye, además a las Formaciones Ayotusco, Roca Verde Taxco Viejo, la Ixcuinatoyac y la Formación Chapolapa. El Complejo de Tierra Caliente es el miembro inferior del terreno Nahuatl, que aflora en los estados de Guerrero y México (Sedlock *et al.*, 1993).

4.1.2 Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)

El (CVTM), es una provincia de edad Miocénica a reciente conformada por unos 8000 centros volcánicos, y es considerado un arco volcánico continental, asociado al proceso de subducción de las placas Rivera y Cocos debajo de la Norteamericana. Cubre de 20 a 150 km de ancho y unos 1000 km de largo, tiene una orientación este-oeste aproximada. (Verma 1987; Garcia Palomo *et al* 2000).

El relieve del Cinturón Volcánico Transmexicano consiste de una serie de planicies escalonadas que se extiende desde las costas del estado de Nayarit hasta las del Golfo de

México en Veracruz. Desde el punto de vista morfológico a escala regional el CVTM se puede dividir en tres sectores: el occidental, caracterizado por la intercepción de tres fosas llamadas Tepic, Colima y Chapala, donde existen estratovolcanes y conos monogenéticos; el central constituido por vulcanismo monogenético y el oriental definido por alineamientos de grandes estratovolcanes en dirección N-S (Pasquare *et al.*, 1987). Los productos volcánicos del Mioceno son de máficos a intermedios con afinidad calci-alcalina a ligeramente alcalina, (Demant 1982). Del Mioceno al presente, el volcanismo consiste de estrato volcanes y centros monogenéticos de magma calci-alcalina, Na-Alcalino, y K-alcalino.

Todas sus estructuras presentan una orientación E-W y NE-SW, en razón del sistema regional de fracturas que afecta a esta gran provincia geológica.

La margen septentrional de la zona de estudio limita con el flanco meridional del CVTM, que en esta parte tiene gran cantidad de conos cineríticos y derrames lávicos, del grupo Chichinautzin, algunos de esos flujos se extienden dentro de nuestra zona, cubriendo relieves anteriores y formando hondonadas y lomas pequeñas carentes de drenaje, con una erosión incipiente.

4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

Geológicamente, el estado de Morelos está constituido por: rocas sedimentarias marinas incluidas en Formaciones Xochicalco, Morelos, Cuautla y Mexcala, rocas ígneas intrusivas y volcánicas, con sus respectivos materiales piroclásticos incluidos en el Grupo Balsas, La Riolita Tilzapotla y Andesita Buenavista; un grupo de rocas volcánicas no diferenciadas que componen al Grupo Ixtlilco, lahares de la Formación Tepoztlán, andesitas que dan nombre a la Formación Andesita Zempoala y materiales clásticos de las Formaciones Cuernavaca y Tlayecac. Las unidades más jóvenes son el aluvión conjuntamente con el Grupo Chichinautzin (Fries, 1960). En la figura 4.1 se observa la posición cronoestratigráfica de cada una de éstas unidades y su relación con las del área de estudio.

En el estado de Morelos existen diversos rasgos morfológicos asociados a una serie de estructuras alargadas con orientación N-S y NW-SE, que corresponden a pliegues anticlinales, formados por rocas calcáreas, plegadas durante la orogénia Laramide; también está el relieve de mesetas o agujas de origen volcánico.

Con base en lo anterior, la constitución litológica del área de estudio consta de rocas sedimentarias de origen marino, las rocas que afloran son: lutitas, calizas, dolomía, pertenecientes a las Formaciones Morelos y Cuautla; conglomerado de edad Terciaria del Grupo Balsas en el noroeste. Mientras que hacia el noreste aflora cuerpos intrusivos de edad Terciaria con aureola de metamorfismo que forma un cuerpo metamórfico.

En el centro y sur de la planicie existe material volcánico no diferenciado, donde se clasificaron andesitas, basaltos, dacitas, tobas, dioritas, y un afloramiento de sienita, del Grupos Ixtlilco y Tlaica. En la zona centro y suroeste de la planicie afloran ignimbritas y riolitas datadas del Terciario (Fries, 1960). Como material Cuaternario aflora conglomerados y brechas de origen volcánico en la parte noreste, este y sureste de la planicie del Popocatepetl y finalmente sedimentos aluviales, distribuido en toda la planicie.

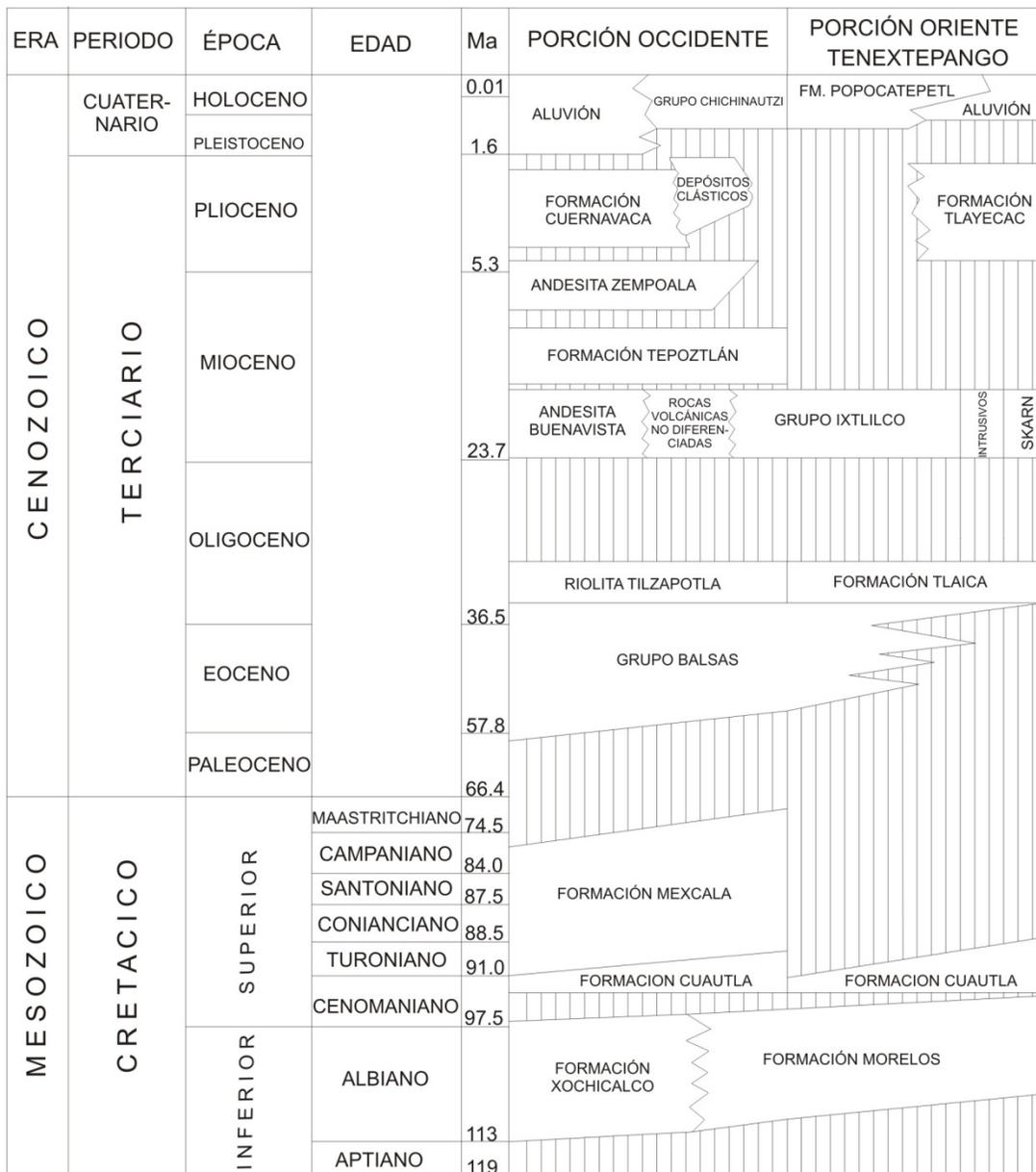


Fig. 4.1 Columna estratigráfica de la porción occidental y la porción oriental del estado de Morelos (Modificado de Fries, 1960).

Con excepción del Grupo Ixtlilco, se adoptaron las unidades estratigráficas establecidas por diferentes autores que han trabajado en zonas inmediatas al área estudiada y que han corregido algunas de las edades propuestas por Fries (1960), para las distintas unidades estratigráficas.

En el presente trabajo se ha delimitado cada tipo de litología que constituyen el Grupo Ixtlilco manifiestas en el área de interés, ya que Fries (1960), únicamente menciona de

manera general, los tipos de roca que hay en ese grupo sin dar ubicaciones precisas; de igual forma se procedió para los cuerpos intrusivos.

4.3 Sondeos Geofísicos

Se realizó un estudio geofísico por la compañía Geotem Ingeniería, S.A de C.V en el año 2009, apoyado en la aplicación de la técnica geofísica conocida como Sondeo Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM); para conocer el comportamiento eléctrico de los estratos del subsuelo que se presenta en la zona de estudio para profundidades del orden de los 600 m. Dichos sondeos se realizaron en dos sitios: uno cercano a la población de Huitzilillas y otro cercano a la población de Tenextepango, ambos en el Municipio de Ayala, en el estado de Morelos.

Los puntos se encuentran ubicados entre las coordenadas UTM 2 065 000 y 2 072 000 de Latitud Norte, y entre las coordenadas 502 000 y 510 000 de Longitud Este (Figura 4.2).



Fig. 4.2 Localización de los sondeos geofísicos dentro del área de estudio.

Para la zona de estudio, se definieron básicamente 3 Unidades Geoeléctricas o intervalos, que se describen en la tabla 4.1 y se analizan más adelante.

Tabla 4.1 Estudio geofísico para estimar las características hidrogeológicas en la población de Huitzililla, municipio de Ayala, estado de Morelos.

UNIDAD GEOELECTRICA	INTERVALO DE RESISTIVIDAD [ohm-m]	INTERPRETACION GEOFISICA
U1	5 a 50	Capa de Cobertura, constituida por materiales arenosos y/o rocas volcánicas
U2a	6 a 13	Materiales arcillo-arenosos se les atribuye una baja a moderada permeabilidad.
U2b	13 a 30	Materiales areno-arcillosos, se le atribuye una regular a buena permeabilidad
U3a	30 a 75	Roca fracturada a poco fracturada, posiblemente con saturación
U3b	75 a 500	Roca compacta, poco fracturada, posiblemente sin saturación.

4.3.1 Unidad Geoelectrica U1: Capa de cobertura

La unidad U1 presenta valores de resistividad entre los 5 a 50 ohm-m y de acuerdo con estos valores, se le atribuyen materiales arenosos que pueden presentar materiales volcánicos y que se consideran de media a alta permeabilidad.

4.3.2 Unidad Geoelectrica U2

La Unidad U2, registra valores de resistividad entre 6 a 30 ohm-m y para un mejor análisis, esta unidad se dividió en dos subunidades. En la subunidad U2a presenta los valores más bajos de resistividad, entre los 6 y 13 ohm-m, los cuales corresponden con los materiales arcillo-arenosos de moderada a baja permeabilidad. La subunidad U2b presenta resistividades que van de los 13 a los 30 ohm-m que corresponden con materiales areno-arcillosos con permeabilidad de regular a buena y que pueden presentar saturación, por lo que esta subunidad puede tener, importancia hidrológica.

4.3.3 Unidad Geoeléctrica U3

Esta unidad agrupa el intervalo resistivo entre 30 a 500 ohm-m y se divide en dos subunidades para una mejor descripción. La subunidad U3a presenta valores de 30 a 75 ohm-m y se asocia con roca fracturada o poco fracturada posiblemente saturada. La subunidad U3b presenta valores de resistividad que varían de 70 a 500 ohm-m, los cuales se relacionan con rocas compactas poco fracturadas.

4.3.4 Perfiles de Resistividad

Para mostrar el comportamiento de los materiales en el subsuelo en el sentido vertical y a profundidades del orden de los 600 m, se construyó un perfil geoelectrico que incluye los 2 sondeos TEM realizados (Figura 4.3).

4.3.4.1 Perfil Geoelectrico

El perfil inicia al sureste del área estudio en el sitio marcado como HUI-1 y se dirige al noroeste hasta llegar al sitio HUI-2 (Figura 4.2), el cual fue construido por dos sondeos TEM y tiene una longitud de 7500 m. La capa de cobertura está representada por la Unidad U1 y presenta resistividades de 5 a 50 Ohm-m y estos valores se asocian con materiales de características arenosas y/o rocas volcánicas, con un espesor cercano a los 90m por debajo del HUI-2 y de 20m en el sitio HUI-1. En la parte inferior de la capa de cobertura y por debajo del sitio identificado como HUI-2 se presenta la subunidad U2b, a la que se le atribuyen materiales areno-arcillosos con permeabilidad de regular a buena y que pueden presentar saturación. En el otro extremo del perfil y por debajo de la capa de cobertura se presenta la subunidad U3b en el sitio TEM definido como HUI-1 y que se presenta a partir de los 20 y hasta los 250 m de profundidad en promedio, la cual se asocia con rocas compactas, poco fracturadas y que posiblemente no presenten saturación. Por debajo de estas dos últimas capas se presentan valores que pertenecen a la subunidad U3a con valores resistivos entre 30 y 75 ohm-m que se asocian con materiales con rocas fracturadas o poco fracturadas, que puede tener una buena permeabilidad y es la subunidad que presenta condiciones más atractivas para el alumbramiento de agua. Finalmente, se

presenta otra capa con las propiedades que identifican a la subunidad U2b con una permeabilidad de regular a buena y que puede presentar saturación y que en segundo término presenta condiciones atractivas para la obtención de agua; por debajo de esta capa se muestra la subunidad U2a que presenta valores de resistividad entre 6 y 13 ohm-m los cuales se asocian materiales arcillo-arenosos y que se le atribuye una permeabilidad de baja a moderada. Toda esta descripción se sintetiza en la Figura 4.3.

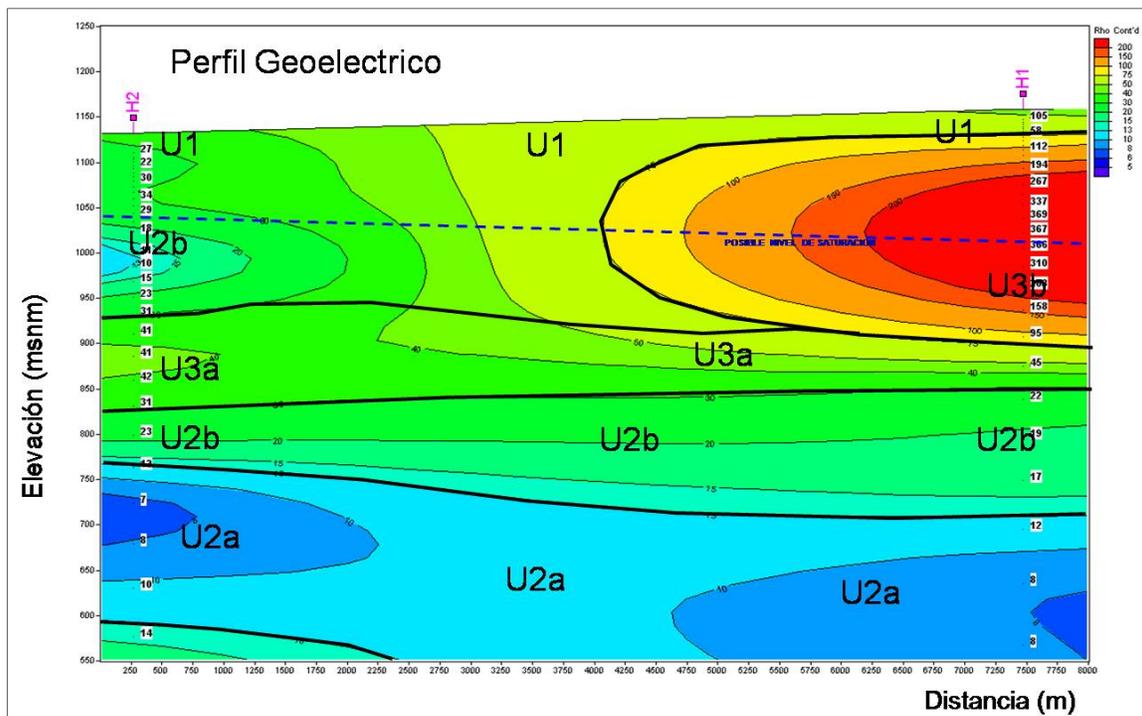


Fig. 4.3 Perfil Geoelectrico de la zona de Tenextepango, Cuautla

4.4 ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA

Las unidades litológicas cartografiadas que integran la columna del área en cuestión y su correlación con la estratigráfica general de la porción occidental del estado de Morelos, se muestran en la figura. 4.1, y en seguida se describen desde la más antigua a la más reciente. También se ha generado un mapa geológico (Anexo A) para describir mejor la distribución espacial de cada una de las unidades litoestratigráficas de la zona.

4.4.1 Formación Morelos

De acuerdo con Fries (1960), la Formación Morelos consiste de una secuencia de rocas calizas y dolomía que afloran en los estados de Morelos, México y Guerrero, y considera que el afloramiento tipo de esta formación está en el área de Tecumán, Morelos y hasta el contacto con la formación Cuautla suprayacente, exhibe las facies litológicas de carbonatos que constituyen la Formación Morelos, aunque su base está oculta. La formación continúa al oriente en los estados de Puebla y Oaxaca, donde se le ha dado otros nombres; en Taxco se observa el límite occidental de ésta formación.

Está constituida por una sucesión de capas de calizas y dolomías interestratificadas con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos, lentes y granos; la Formación Morelos contiene también fragmentos de fósiles, destacando los rudistas pelecípodos y gasterópodos (Fries, 1960).

La cantidad de sílice y arcilla es relativamente pequeña y su constitución es principalmente de carbonatos. En función del clima que prevalece en esta zona, las rocas de esta formación son muy resistentes a la erosión y tienden a formar relieves altos y redondeados.

En este estudio únicamente se reconocieron rocas del miembro superior de esa unidad litoestratigráfica que afloran en el sector noroeste y norte el área, se trata de caliza color beige y rosado en afloramientos masivos y en estratos de aproximadamente 60 cm de espesor, en las laderas de los Cerros el Mirador, Tenayo e Idolo, que se ubican al oeste de Ciudad Ayala. También se encontraron pequeños afloramientos de calizas al oeste del poblado de Moyotepec (Figura 4.4).



Fig. 4.4 Afloramiento y tipo de estructura de la formación Morelos.

Las calizas están afectadas por tres importantes sistemas de fracturas, NE-SW; NW-SE y E-W, las cuales tienen aberturas desde mm hasta 20 cm que son resultantes de los esfuerzos a los que han estado expuestas estas rocas (Figura 4.4).

La Formación Morelos constituye casi la totalidad de los cerros Ajonjoli, Olinche y Castillo (Anexo A), en los dos primeros la caliza es de carácter masivo y presenta costras de pedernal.

Otros dos afloramientos de caliza de la Formación Morelos se localizan en la punta del cerro El Gallo, ubicado en la región oeste del pueblo de San Vicente de Juárez. En las laderas del cerro la Tortuga, los afloramientos de caliza presentan un espesor de 20 cm a 1 m con fósiles de bivalvos, ostrácodos y rudistas; por lo general las zonas donde la caliza es de tipo masiva, existe una delgada capa de pedernal, a manera de costras, esparcidas sobre la caliza. De acuerdo con Fries (1960), este pedernal pudo haberse depositado por la migración del sílice y el reemplazo durante la diagénesis de los sedimentos calcáreos; la caliza presenta rasgos muy notables de disolución como lapiaz, surcos, así como pequeñas dolinas.

De acuerdo con Fries (1960), la parte basal de la Formación Morelos está constituida por un miembro de anhidrita, el resto, está formado por capas de carbonatos de edad más joven. El color de la Formación Morelos varía de gris cremoso claro a negro. Los estratos de esta unidad son en general bastante gruesos, quedando entre los 20 y 60 cm de espesor.

Después de la sedimentación que dio origen a la formación Morelos hubo un periodo de falta de depósito y de erosión pre-Cuautla. La superficie de erosión desarrollada en este

periodo fue cubierta por diferentes facies y horizontes de la Formación Cuautla que sobreyace a la Formación Morelos (Fries, 1960).

De acuerdo con diferentes autores, los fósiles índice que se emplearon para datar a la Formación Morelos fueron los siguientes: *Dycyclina schumbergery* (Munier- Chalmas en Fries, 1960) y *Nummoloculina heimi* (Bonet, 1956), con lo que establecieron la edad del Albiano Superior- Cenomaniano Inferior. Ontiveros-Tarango (1973) describió microfósiles bentónicos (*Nummoloculina heimi*, *N. sp.*, *Dictyoconus sp.*, *D. walnutensis*), foraminíferos planctónicos, calciesferulidos y *sedis incertae* en la base de la Formación Morelos; que afloran en la parte noroeste y estableció una edad de Aptiano a Cenomaniano, consideró a esta formación correlacionable con la facies pelágica de la Formación Tamaulipas Superior; más tarde, Aguilera-Franco (1995), Zamudio-Ángeles y Ferrusquía-Villafranca (1996), reconocieron otros fósiles índice dentro de esta formación a los cuales asignaron edades de Albiano superior-Cenomaniano-Turoniano.

4.4.2 Formación Cuautla

Fries (1960), llamó Formación Cuautla a una unidad que consta de tres facies de caliza que pasan gradualmente de una a otra en sentido lateral, que afloran y constituyen las serranías al oeste de la ciudad de Cuautla. Las facies descritas por dicho autor, son: 1) una sucesión gruesa de capas de calizas en estratos de medianos a gruesos, del tipo de banco calcáreo, 2) una sucesión más delgada de capas calizas laminadas de estratificación delgada a mediana y 3) una sucesión de calizas clásticas que forman capas de estratificación delgada a mediana.

Ésta formación se extiende al sur y al poniente de Iguala como una unidad de caliza delgada, mientras que al sureste y al oriente de Iguala continúa en forma de facies de banco calcáreo grueso a través de la parte nororiental de Guerrero; al oriente, desde el estado de Morelos hasta la parte suroccidental de Puebla, por una distancia desconocida. Al norte de Morelos continúa debajo de la cubierta terciaria y reaparecen cerca de Apaxco, donde aflora en diversos sitios en su facies de banco, hasta el centro occidental del Estado de Hidalgo.

Según Fries (1960), la facies de banco grueso de la Formación Cuautla, posee características fisiográfica similares a la Formación Morelos infrayacente reflejando la semejanza en su estratificación, estructura y textura pero se presenta con diferentes especies fósiles (Aguilera-Franco y Hernández-Romano, 2004), además de la gran diferencia significativa en la resistencia a la erosión entre ambas unidades es la escasez relativa de dolomita en la formación Cuautla.

Al miembro inferior de la Formación Cuautla, Hernández-Romano (1999) lo llamó Miembro Huiltziltepec, el cual consiste de packstones-grinstones intraclásticos peloidales y bioclásticos. De acuerdo con este autor, en dicho miembro se encuentran fósiles de foraminíferos bentónicos *litoulidos scarce*, *dasycladacean*, *udoteacean*, *gymnocodiacean* y *algae coralline*, ostrácodos, equinodermos y crinoides, así como escasos calciesferulidos y fragmentos de foraminíferos planctónicos, correspondiendo a la facies tres que describe Fries (1960).

Otro miembro descrito por Hernández-Romano (1999), es el Miembro Zotoltilán donde dominan las calizas arcillosas nodulares intercaladas con lutitas calcáreas y lutitas con fósiles de mar abierto. Los fósiles contenidos en estas calizas principalmente son calciesferúlidos, roveacrínidos, algas *udoteacean* y *gymnocodisacean*, foraminíferos planctónicos, corales, rudistas, aquinoides y braquiópodos.

Dentro del área de interés, ésta caliza constituye a las sierras situadas al oeste de la ciudad de Cuautla, donde sobresalen los cerros Tenayo, Idolo y Mirador, ahí la estratificación varía de gruesa a delgada y parcialmente es masiva. Fries (1960), se refirió a ella como una "facies de banco calcáreo", que contiene abundantes macrofósiles de equinodermos, radiolítidos, corales solitarios y en colonia, y braquiópodos. En otras zonas se observa claramente estratificada, siendo el espesor de los estratos variable y hay zonas donde llegan a medir desde 0.1m hasta 1.0 m, como en el cerro el Aguacate; que de acuerdo con Fries (1960), corresponden a la segunda facies, de capas calizas laminadas de estratificación delgada a mediana de la formación Cuautla. El color varía de gris claro a rosa o rojiza; la tercera facies de la formación no fue observada en el área de estudio, debido quizá a que fue erosionada.

En la parte noroeste es muy común observar lapiaz vesicular; también en este sector se observaron calizas arcillosas muy cerca del fraccionamiento Joya Escondida, la cual contiene fósiles de bivalvos y forma relieves alargados de poca elevación con orientación NW-SE.

Finalmente, al norte de Atotonilco (Anexo A), las calizas de la Formación Cuautla afloran en un relieve de poca elevación al suroeste del cerro el Cuachi, las calizas presentan un color gris claro a rosa con estratificación mediana muy fracturada. Al igual que en la Formación Morelos la caliza Cuautla está afectada por tres importantes sistemas de fracturas, NE-SW; NW-SE y E-W. La mayoría son fracturas que tienen aberturas desde mm hasta 20 cm; que debe ser resultado de los diferentes esfuerzos a los que han estado expuestas estas rocas.

En cuanto a relaciones estratigráficas, la Formación Cuautla descansa directamente encima de la formación Morelos. Se piensa que existió un periodo de regresión marina y erosión que fue la causa de la separación de las dos formaciones, las evidencias se encuentran en los horizontes estratigráficos y tipos litológicos diferentes que se presentan debajo de la caliza Cuautla a distancias relativamente cortas. La fracción arcillosa de las capas basales de la Formación Cuautla, podrían representar el residuo insoluble producido por el intemperismo subaéreo que disolvió la caliza y la dolomita Morelos; las dos unidades se encuentran en concordancia.

La unidad suprayacente a la Formación Cuautla es la Formación Mexcala, que también descansa concordantemente. La unidad Mexcala ha sido removida en muchos lugares por intemperismo y erosión, lo que ocasiona que cualquier otra formación más joven pueda descansar directamente sobre la Formación Cuautla en discordancia angular (Fries, 1960).

Fries (1960), asignó una edad Turoniana a la Formación Cuautla, y sugirió que los cinturones calcáreos basales, que más tarde Hernández-Romano (1999) llamó Miembro Huitziltepec, podrían haberse originado durante el Cenomaniano Tardío; como ha sido confirmado por Aguilera-Franco (2000), que lo asigna al Cenomaniano Tardío-Coniánciano. El miembro Zotoltilán pasa transicionalmente de calizas pelágicas a rocas siliciclásticas de la Formación Mexcala (Fries, 1960; Aguilera-Franco *et al.*, 1998a; Hernández-Romano, 1999).

Alencáster *et al.* (1987), estudió la macrofauna de la parte este de la base de la formación y asignó edades del Turoniano-Coniánciano a las rocas de la Formación Cuautla. Aguilera-Franco *et al.* (1992) asignó a las mismas rocas, edades de Turoniano-Santoniano

4.4.3 Formación Mexcala

Esta formación fue definida por Fries (1960), el nombre se refiere tanto al pueblo como al Río Mexcala.

La Formación Mexcala consta de intercalaciones de lutitas, limolitas y areniscas calcáreas que se convierten en conglomerado en la parte superior (Fries, 1960; Dávila-Alcocer, 1974; Aguilera-Franco *et al*, 1988b). La caliza basal fue interpretada por Aguilera-Franco (2004) como depósito basal pelágico, que representa la transición entre plataforma superior y propiedades pelágicas: *caliza foraminífera-calciesferúlida* la cual indica un ambiente de depósito en mar abierto, de baja energía. Las lutitas- limolitas- areniscas, fueron interpretadas como facies de prodelta y de costa somera; mientras que las areniscas y conglomerados se interpretaron como facies de planicie deltáica (Fries, 1960; Aguilera-Franco, 1995 y Hernández-Romano, 1999).

Como se indicó anteriormente, debido al proceso de erosión la Formación Mexcala no aflora dentro del área de estudio. El afloramiento más próximo está 2 Km al noroeste del cerro el Idolo, donde se aprecian lutitas de color café ocre al intemperismo, pertenecientes a dicha unidad; las rocas que están muy deformadas presentan los típicos pliegues chevron y numerosas fallas tanto normales como laterales, principalmente izquierdo, con una tendencias de S 60 W /50. La deformación que sucedió después del plegamiento de esta unidad litológica, imprime un aspecto esquistoso a la lutita, y enmascara el espesor de los estratos, apreciándose laminaciones desde 4 mm y estratos de hasta 20 cm.

La formación Mexcala subyacente, en discordancia a las rocas volcánicas y aluviales Cenozoicas del Grupo Balsas y sobreyace a la Formación Cuautla, y en algunos sitios, a la Formación Morelos, debido a factores de erosión.

Aún existen diferencias respecto a la edad de esta unidad, pues varía según la proximidad de la paleocosta, fuente del material clástico y la posición de los bancos calcáreos, con base en diversas especies de fósiles como foraminíferos planctónicos, calciesferúlidos, y radiolarios, en general, Fries (1960), Aguilera-Franco *et al*. (1988b, 1995) y Hernández-Romano (1995.), han determinado que la edad de esta formación varía entre el

Cenomaniano Tardío al Mastritchiano (Cretácico superior), por su parte Aguilera-Franco (2002), lo define con edad del Cenomaniano-Turoniano.

4.4.4 Grupo Balsas

Fries (1960) asignó el nombre de Grupo Balsas al depósito de rocas que comprende una variedad grande de tipos litológicos de espesor variable de origen continental, el cual se presenta en la cuenca hidrológica del Río Mexcala–Balsas en el centro austral y el suroeste de México.

El grupo incluye rocas muy diversas como son yeso, caliza lacustre, conglomerado calizo, conglomerado volcánico, arenisca tobácea, limonita tobácea y arcilla, así como brechas, tobas volcánicas y corrientes lávicas interestratificadas. Morfológicamente el Grupo Balsas forma relieves redondeados, terrazas y lomas alargadas siempre ajustados a la topografía preexistente.

Este nombre ha sido aplicado a estratos similares en los estados de Michoacán, Guerrero y Morelos (López-Ramos, 1979).

El Grupo Balsas fue interpretado por Molina-Garza (2006) como un abanico aluvial, que de acuerdo con Fries (1960), las capas basales están constituidas predominantemente por conglomerado calizo de grano grueso bien endurecido, con matriz calcárea y de estratificación masiva a gruesa, los cantos rodados varían de angulosos a bien redondeados, y de hasta 100 cm de diámetro; compuestos por calizas, dolomía, en menor cantidad arenisca, todos derivados de las Formaciones Morelos, Cuautla y Mexcala; mientras que las capas superiores más jóvenes, están compuestas por limo, arena y conglomerado tobáceo poco endurecido.

Dentro del área que ocupa este estudio, el conglomerado Balsas cubre una extensa superficie desde las inmediaciones del pueblo de Moyotepec (región oeste) hasta Rafael Zaragoza, (porción suroeste); donde cubre a las Formaciones Cuautla y/o Morelos, o bien, se encuentra rodeando los afloramientos de éstas; como se muestra en el Anexo A. Se trata de cantos subredondeados de caliza color gris claro, rojizo u oscuro en matriz limo-arenosa rojiza, en ocasiones blanca, muchos de los clastos contienen microfósiles de

bivalvos y gasterópodos remplazados por carbonato y/o sílice (Figura 4.5). El conglomerado puede estar poco o muy compactado, como se observa en la salida de Moyotepec hacia Chinameca o al oeste de la colonia E-Zapata. Esta unidad litológica corresponde a la unidad geoelectrónica U2a (Figura 4.3).



Fig. 4.5 Conglomerado Balsas

Al norte de Jaloxtoc, se forma los bordes del cerro Tencuancoalco donde el conglomerado presenta estratificación gruesa a delgada; ahí, consiste de una brecha calcárea cuyos fragmentos son de color gris oscuro están muy cementados y angulosos que se asocian más con una brecha tectónica.

Los lugares donde el conglomerado está muy compacto, también es afectado por los sistemas de fracturas NW- SE; W-E- y por fallas verticales.

El espesor del Grupo Balsas es extremadamente variable, su espesor mayor se encuentra en lugares donde los bloques se hundieron más profundamente y los depósitos quedaron protegidos de la erosión. La sucesión más gruesa parece exceder los 2, 500 m. y se localiza en Santa Fe, cerca del pueblo de Amacuzac a 70 km al noroeste de Tuzantlán Guerrero, donde los depósitos están cubiertos en discordancia angular por fragmentos de riolitas y andesitas (Monter-Ramírez *et al.*, 2004)

En algunos sitios los estratos están plegados, inclinados y fallados (Cerca-Martínez *et al.*, 2004). En todas partes se presentan con inclinaciones de moderadas o fuertes, siendo muy raro encontrar capas horizontales. Son escasos los buzamientos menores de 10° y un

promedio quedaría quizás entre 20° y 30°, con inclinaciones locales hasta de 70° o más en las proximidades de las fallas (Fries, 1960). Los estratos del Grupo Balsas sobreyacen en discordancia erosional a las rocas más antiguas de la región, (Fries, 1960).

La formación suprayacente al Grupo Balsas se conoce como Riolita Tilzapotla, así nombrada por Fries (1960) ó Ignimbrita Tilzapotla por Morán-Zenteno *et al.* (2004), y se encuentra en discordancia angular con las capas superiores del Grupo Balsas, siempre que no haya intervenido la erosión, entonces la unidad suprayacente puede ser cualquiera de las formaciones volcánicas del Terciario medio, así como la Formación Cuernavaca del Terciario Tardío o aún rocas de edad Cuaternaria. La Figura 4.1, muestra la relación estratigráfica que guarda el Grupo Balsas dentro del estado de Morelos.

Esta unidad fue fechada, por Fries *et al.* (1955) en rocas del distrito minero de Guanajuato, ubicado en el centro del estado; dichos autores proponen que el Grupo Balsas pertenece al Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano. Molina-Garza y Ortega-Rivera (2006), asignaron edades de 32 a 37 Ma. a rocas de este mismo grupo que afloran en Tuzantlán –Copalillo, al noreste de Guerrero; por otra parte, Cerca-Martínez (2004), obtuvo una edad radiométrica de 37.6 ± 0.3 Ma, (Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano), para andesitas que están intercaladas en rocas correlacionadas con el Grupo Balsas.

4.4.5 Formación Tlaica

La Formación Tlaica fue propuesta por Fries (1960), para una secuencia de ignimbritas, derrames de lava y brechas volcánicas de composición riolítica. Los afloramientos más importantes se encuentran 0.5 km al norte del poblado de Tlaica. Díaz Bravo (2005) reporta esta unidad a lo largo de la margen occidental de la Sierra de Huautla en una franja semiparalela a la carretera que une a los poblados San José de Pala, San Pablo Hidalgo y Chinameca.

Se trata de una ignimbrita, y derrames de lava con cantidades menores de brecha volcánica y material volcanoclástico, de composición riolítica o riodacítica. El color predominante es el rosado- ocre; pero en algunos lugares se presenta blanquecina parda

y verdosa, se presenta en forma masiva, compacta y dura, el tamaño de los granos varía desde algunos mm hasta 4 cm.

Diaz-Bravo (2005) la divide en tres unidades de ignimbrita, las cuales representan tres eventos diferentes de flujos piroclásticos: la unidad inferior corresponde a una ignimbrita vitrocrystalina de color rosa y otras dos ignimbritas pumicíticas, una de color blanco y la otra de color verde.

En el área de estudio (ver Anexo A), la Formación Tlaica se cartografió en el pueblo de Tlaica, donde se observa en forma masiva muy compacta de color café ocre; en la zona centro oeste en los Poblados Emiliano Zapata y San Vicente de Juárez; muy cerca de San Vicente sobre la carretera a Moyotepec, se obtuvo una muestra para lamina delgada (denominada Cua 21), que se clasificó como una toba compuesta principalmente de cuarzo, vidrio, ceniza y en menor cantidad feldespatos alcalinos, augita como mineral accesorio (ver Anexo B).

En la zona centro oriente aflora la mayor extensión de esta formación, en las localidades Colonia Adolfo López Mateos y Huacatlaco. En la barranca Seca, la Formación Tlaica subyace en discordancia erosional a los depósitos aluviales del Cuaternario y a las lavas del Grupo Ixtlilco. Constituye los cerros Piñuela y Cacalote. Finalmente se reconoció al suroeste de la zona de estudio, a lo largo de la carretera que va hacia Chinameca.

Una de las tobas caracterizadas en los estudios petrográficos fue una toba andesítica que aflora en el sector suroeste, muy cerca del poblado de Chinameca, y al norte, donde se observó otro afloramiento, en la Barranca la Cuera y sobre la carretera que va de Colonia Loma Bonita a El Salitre; por último, se observó en el extremo norte de la superficie en estudio, cerca del poblado Colonia Benito Juárez, ahí se encuentra en contacto con el basalto. En el extremo oeste, se clasificó una toba cristalina, en contacto con el Grupo Balsas al sur de la Colonia Emiliano Zapata.

La mayoría de las muestras en lámina delgada, presentan textura porfídica microlítica en ocasiones traquítica, con cristales subhedrales, en algunas muestras existe presencia de vidrio y ceniza, son claramente observables los fragmentos de roca donde predomina la andesina como mineral esencial, en algunos casos oligoclasa y, con menores cantidades de ortoclasa y cuarzo; como mineral accesorio se clasificó principalmente hornblenda, en mínimo porcentaje augita y enstatita (Ver anexo B).

La unidad Tlaica es muy parecida en composición a la unidad contemporánea llamada Riolita Tilzapotla y sobreyacen en concordancia al Grupo Balsas (Fries, 1960).

Moran-Zenteno *et al.*, (2004) asumen que la Formación Tlaica es una facies externa de la riolita Tilzapotla; cuya fuente es una caldera resurgente de dimensiones de 33 x 24 km, de estructura semielíptica. De acuerdo con éste autor, las emisiones al este y sur de la caldera, alcanzaron distancias de hasta 36 km a partir de la margen de ésta, extendiéndose hasta Amacuzac y al norte de Buenavista, y existiendo las mejores secciones al sur de Valle de Vázquez, poblado ubicado a aproximadamente quince kilómetros al sur de Chinameca y a doce kilómetros al este de la caldera.

Fries (1960), reporta que esta unidad pertenece al Oligoceno tardío, con una edad de 26 millones de años.

En la correlación que hace Morán-Zenteno *et al.*, (2004) de la Riolita Tilzapotla con la Formación Tlaica, reporta edades desde 32 Ma hasta 34 Ma, lo que indica una resurgencia de eventos relacionados con la emisión de magma. Esta unidad litológica corresponde a la unidad geoelectrónica U3a.

4.4.6 Grupo Ixtlilco

El Grupo Ixtlilco fue descrito por Fries (1960), tomando como localidad tipo a la secuencia de rocas volcánicas que afloran entre Ixtlilco el Grande y el Cerro Palo del Presidente, situado al poniente del estado de Morelos.

De acuerdo con Fries, (1966), está formado por derrames de lava interestratificados con capas volcanoclásticas, las lavas difieren notablemente en textura y color pero parece que en composición química son uniformes, fueron determinadas como traquiandesitas. En el área que ocupa a este estudio, se podría considerar una variedad en las rocas reconocidas, que va desde dacita a basalto. Estudios recientes de Moran Zenteno *et al.*, (1998), reportan que la parte inferior de la secuencia silícica tiene un espesor de aproximadamente 100 m de tobas blancas a verdes, esa secuencia, se encuentra cubierta por una delgada capa de toba rica en cristales de hematita que a su vez, subyace una serie de flujos de lava dacítica a andesítica con estructuras vesiculares y de

flujo laminado. Esos flujos de lava contienen fenocristales de plagioclasa zoneada, hornblenda, clinopiroxeno y en algunos casos cuarzo modal y biotita.

Estas diferentes rocas que afloran dentro de este Grupo Ixtlilco no fueron diferenciadas por Fries, posteriormente algunos autores (Sánchez-Montes de Oca, 1961 y Díaz-Bravo 2005), han dado clasificaciones informales a algunos de sus miembros, sin embargo no se han descrito oficialmente.

En la mayoría de los afloramientos, el Grupo Ixtlilco se encuentra sobreyaciendo en discordancia erosional a la Formación Tlaica y, en menor proporción a las unidades calcáreas del Cretácico. El grupo se acuña en distancias cortas hacia el poniente, norte y oriente, en parte por haberse depositado alrededor de un centro extrusivo, y por otra parte debido a la erosión. La pseudoestratificación que presenta el grupo, se encuentra inclinada con buzamiento general hacia el centro del afloramiento mayor, donde probablemente se encuentre el foco de la emisión de estas rocas. Debido a la intensa erosión a la que han estado sometidas estas rocas en su parte superior, no se ha podido determinar su espesor real, pero se considera que puede llegar a medir hasta 500 m. en algunas zonas (Fries, 1966).

En el área de estudio estas rocas sobreyacen al Grupo Balsas y son más antiguas que la Formación Chichinautzi. Su edad establecida exclusivamente por posición stratigráfica debe ser Oligoceno Tardío-Mioceno (Fries, 1966), ya que subyacen a riolitas cuya edad es Oligoceno Tardío; no se tienen estudios recientes con dataciones radiométricas. En esta zona, se reconoció que la litología del Grupo Ixtlilco varía desde dacita a basalto y en seguida se describe cada una de esas unidades.

En el sector sur se localiza el afloramiento de mayor extensión del Grupo Ixtlilco que inicia al sur de la colonia Adolfo López Mateos con un relieve de lomeríos de poca elevación y se continúa en el relieve de serranías del sector sur, a cuyos lados están los poblados de Tepalcingo y Chinameca. El relieve de lomas se ubica hacia los poblados de Moyotepec de San Vicente y Salitre, Loma Bonita.

Con respecto al sondeo geoelectrico, ésta unidad es equivalente con la unidad U3b.

Andesita

La andesita, es la unidad predominante en el área correspondiente al Grupo Ixtlilco de la zona de estudio, puede ser encontrada desde el norte de la planicie de Tenextepango hasta el extremo sur y se presenta de color rosa claro con tintes de color gris, la estructura es masiva y compacta de grano fino.

En lo que respecta a la parte norte, de este a oeste, encontramos afloramientos de andesita al oriente del poblado San Juan Ahuehuevo, sobre la carretera que lo une con la zona industrial de Cuautla; tres kilómetros al poniente, en la colonia Loma Bonita también aflora esta unidad, vuelve a aflorar en las afueras de Moyotepec, sobre la carretera que cruza San Vicente de Juárez aflora nuevamente, se vuelve a presentar en el cerro El Mirador cercano a El Salitre (Ver Anexo A).

Un poco más al sur, fueron cartografiados otros afloramientos de andesita: en la Barranca la Cuera y sus cercanías; en la misma latitud, hacia el este, aflora en las cercanías de la Colonia Adolfo López Mateos y en el Cerro el Chumillar, hasta aquí, se observó el desarrollo de una secuencia espacial que va de andesita a basalto.

El extremo sureste de la zona, el poblado de Tepalcingo y la zona aledaña está formada por una topografía accidentada compuesta de andesitas basálticas, de acuerdo con los resultados obtenidos de la sección delgada Cua 32 (Anexo B), de ahí hacia el oeste la observamos aflorando cerca de la colonia Lauro Ortega, y al extremo suroeste, se vuelve a observar muy cerca del Poblado Tepehuaje, cerca de la carretera a Chinameca (Anexo A). El afloramiento se presenta en color rosa con tintes blancos, de grano medio compacto.

Las muestras vistas al microscopio petrográfico, presentan textura porfídica microlítica en ocasiones traquítica, con cristales subhedrales. En cuanto a su composición, predomina la andesina como mineral esencial y en algunos casos oligoclasa, en la mayoría de las láminas delgadas se observa que los cristales de plagioclasa aparecen zoneados, como mineral accesorio se clasificó principalmente hornblenda y lamprobolita, en mínimo porcentaje augita y alteraciones a clorita (Anexo B). En particular, en el afloramiento que se encuentra en las cercanías de Moyotepec se clasificó cuarzo como relleno de las vesículas (Cua 18); y algunas otras muestras presentan vidrio (Cua 28, Cua 50).

Basalto

Los afloramientos de basalto se ubican principalmente en la parte central y sur del área de estudio, en la zona centro, de este a oeste, se cartografiaron afloramientos de basalto en la base del cerro El Chumillar, ubicado al oriente de Huacatlaco, posteriormente, se ubica otro afloramiento al sur de la Colonia Buenavista, muy cerca de la carretera al Salitre y al extremo oeste muy cerca del poblado San Vicente de Juárez y de la colonia Emiliano Zapata; hacia el suroeste, fueron reconocidos afloramientos de basalto sobre la carretera que va de Tepalcingo a Chinameca que forma el Cerro El Bonete; en los sectores sur central y oriental no se encontraron afloramientos de basalto (Anexo A).

Esta roca, contiene como mineral esencial, labradorita, gran cantidad de augita, en menor proporción hiperstena, ensastita y en algunos casos se observó olivino y biotita en pequeñas cantidades así como minerales opacos (Cuau 20, 24, 38 al centro, Cuau 36 y 42 al NE).

Dacita

La unidad dacita es menos común que las dos anteriores en el área de estudio; se cartografiaron tres afloramientos en la parte centro y sur de la planicie, el primero se ubica en el extremo este de la parte central del área, en la ladera noreste del Cerro El Chumillar, cerca de la Colonia Adolfo López Mateos; el siguiente afloramiento se ubica en el extremo opuesto, occidental, sobre la misma longitud en el Cerro La Cruz, ubicado al sur de la localidad San Vicente de Juárez; por último, la unidad aflora en el extremo sur de la planicie sobre la carretera que va de Huitchila a Los Sauces.

Estas rocas forman un relieve de tipo cóncavo, el afloramiento presenta color rosa claro con tintes color gris, de grano fino, masivo y compacto. En lámina delgada, la roca presenta textura porfídica con cristales subhedrales, de plagioclasa y cuarzo como minerales esenciales y como accesorio, biotita y minerales opacos, en la muestra Cuau 52 se observó vidrio como uno de los componentes esenciales (Anexo B).

A excepción de la andesita basáltica y el basalto, las rocas restantes presentan una fuerte alteración asociada a antiguos flujos hidrotermales, que formaron horizontes de tobas y arcillas andesíticas de colores verde y blanco, esa alteración fue complementada por

intenso intemperismo físico y químico; que en gran parte es resultado del intenso fracturamiento que afecta a la secuencia de rocas del Grupo Ixtlico.

4.4.7 Formación Tlayecac

La Formación Tlayecac tiene su localidad tipo en el cerro El Mirador, situado al norte de la carretera Cuautla-Izucar de Matamoros, ahí aflora con un espesor de cerca de 100 m sin base expuesta. Representa un depósito muy notable de material clástico derivado del mismo volcán y en el afloramiento tipo, se encuentra interdigitado con la Riodacita Popocatepetl, que forma la composición principal del volcán con el mismo nombre (Fries 1966).

De acuerdo con Fries (1966), la Formación Tlayecac está formada por capas masivas constituidas de trozos angulosos y subangulosos con diámetros de hasta 1 m, mezclados con otros más pequeños y con material de grano fino del tamaño de arcilla, depositadas por corrientes de lodo proveniente del volcán Popocatepetl. El material no está cementado, no obstante se encuentra muy compacto, los espesores de las capas son de más de 15 m, sin plano de estratificación y suelen formar acantilados en los flancos de las barrancas.

En el área de estudio, los materiales de ésta unidad litológica, constituyen la base de la secuencia clástica de composición poligmítica de la planicie desde Tenextepango hasta Xalostoc, Hucatlaco, donde se constituye de flujos de lahares y conglomerados, los estratos varían de 70 cm a 1.30 m, con horizontes finos de aproximadamente 30 cm, y brechas volcánicas basálticas, en la parte superior todas llevadas por agua.

En la barranca la Cuera a la orilla de Xalostoc, la secuencia presenta lahares en la base, formado por estrato de bloques en matriz areno-limos, y horizontes de arena y limo, en seguida el conglomerado y después la brecha en la cima. Los espesores son variables en promedio 20 m. el grado de compactación es variable, sin llegar a estar cementados. En la barranca Seca, el depósito del lahar muestra una predominancia de matriz arcillosa, mientras que en la barranca de Tlayecac se presentan como potentes acumulaciones de lahares con escasa matriz, muy compactos.

Hacia Tecomalco la constitución clástica de los lahares presenta más su afinidad fluvial, siendo aún corrientes de lodo.

La formación Tlayecac descansa en discordancia angular sobre las rocas volcánicas del Grupo Tepexco, unidades terciarias y rocas cretácicas; al noreste, se encuentra interdigitada con ciertas partes del grupo Chichinautzin. De acuerdo Fries (1960), los derrames de este material llegaron a extenderse más de 50 km a partir de su centro emisor, ya fuera en una sola etapa o en varias. En algunos sitios, esta unidad se encuentra cubierta por material clástico más reciente.

El volcán Popocatepetl ha tenido erupciones durante tiempos históricos y su actividad aun no se ha extinguido. Sus productos se han interdigitados con otras unidades que también datan del presente hacia atrás, pero en base a las descripciones de unidades anteriores, Fries (1960) señala que la formación Talyecac se originó durante el Pleistoceno medio.

Con respecto a los sondeos geoelectricos realizados en la zona, ésta unidad se asocia con la unidad geoelectrica U2b (Ver Tabla 4.1).

4.4.8 Aluvión

Esta unidad se encuentra restringida por la topografía del área, en forma de cuenca. El depósito incluye materiales no consolidados de fragmentos angulosos gruesos que varían desde arcilla, limo arena, grava y cantos rodados, en ocasiones ceniza, cuya fuente es el relieve preexistente. Dentro del área de estudio se reconoció aluvión de composición calcárea semiconsolidado en la zona noroeste, inmediatamente al este, se tiene como relleno aluvión de composición volcánica (Anexo A). En la porción sureste el aluvión es muy heterométrico poco consolidado y es una mezcla de fragmentos de rocas andesíticas y calizas. Mientras que en el suroeste se mezclan fragmentos del Conglomerado Balsas, calizas y volcánicos. De acuerdo con el estudio de geofísica realizado en la zona, este material de relleno alcanza hasta doscientos metros de espesor aproximadamente y corresponde a la unidad U1 (Figura 4.3).

4.4.9 Rocas Ígneas Intrusiva (Troncos Xalostoc)

Fries (1960) cartografió cuerpos intrusivos en estructuras de diques, mantos y troncos en diferentes áreas, las más antiguas de la región (pre-Cretácico) afloran en el distrito de Taxco, Amacuzac y en Buenavista de Cuellar. La composición varía, desde dioritas a granitos, que se asocian con diferentes episodios magmáticos (Morán-Zenteno, 1999; Cerca-Martínez, 2004).

En el presente estudio, las rocas intrusivas se cartografiaron en el noreste de la planicie de Tenextepango, al oriente de Xalostoc.

Los cuerpos intrusivos cartografiados por Fries (1960) en diferentes localidades del estado de Morelos, tienen diversas composiciones. En el área de Xalostoc, un grupo de troncos intrusivos fueron clasificados como diorita y coinciden con los clasificados por el mismo autor. Con base en nuestras observaciones de campo, este cuerpo se extiende desde el cerro Xalostoc hasta el cerro El Organal y quizás más allá. En el área de estudio, se identificaron más de un tipo de rocas intrusivas de este a oeste, granodiorita, diorita, cuarzosienita, sienita y nuevamente cuarzosienita (Anexo A).

La muestra (Cuau 58), presenta a simple vista, textura porfídica pero al microscopio petrográfico presenta claramente una textura pertítica, muy característica en este tipo de rocas, clasificada petrográficamente como sienita cuarcífera. Consta de un alto contenido de feldespato (ortoclasa), menor cantidad de oligoclasa y aproximadamente 10% de cuarzo; el mineral secundario encontrado es el piroxeno en su variedad de augita, maclado (Anexo B).

De acuerdo con Fries (1960), los cuerpos intrusivos descritos anteriormente, cortan a las formaciones Cretácicas, al Grupo Balsas y Fm Tlaica y de acuerdo con Morán-Zenteno (2005), fueron emplazados durante un episodio magmático regional ocurrido al finalizar el acortamiento Laramide en la región de Mexcala hasta Acapulco.

Con base en fechamientos radiométrico K-Ar, Ar-Ar reportados por Fries (1960), estas rocas intrusivas poseen una edad Terciaria Media y Tardía; edades que fueron confirmadas por De Cserna y Fries (1981), Alaniz-Álvarez *et al.* (2002), Morán-Zenteno *et al.* (2004), empleando los mismos métodos de datación y cuyos resultados dicen que fluctúan entre

31 y 38 Ma de edad. En general, en la región de Taxco-Huautla se distribuyen diferentes cuerpos volcánicos y plutónicos, la mayoría de composición silícica.

4.4.10 Cuerpo Metamórfico

La unidad metamórfica cartografiada se ubica hacia el extremo noreste del área de estudio, en las inmediaciones del pueblo Tlayecac y se extiende al sur en el Cerro Xalostoc. Esta unidad resulta del metamorfismo de contacto de las calizas Morelos y Cuautla con el vulcanismo que tuvo lugar durante el Terciario. La roca corresponde a un skarn de bajo grado (Cuau 55). La muestra de mano presenta un color blanco a gris con ligera foliación, su principal constituyente observado al microscopio petrográfico es la calcita con una mínima cantidad de cuarzo.

Este cuerpo metamórfico se puede considerar contemporáneo a los eventos magmáticos del Terciario antes mencionados.

El skarn es una roca encajonante de los intrusivos terciarios de esta zona y subyace a una brecha calcárea de las calizas Morelos y Cuautla, así como a depósitos aluviales plio-cuaternarios.

4.5 Marco Estructural de la región de Tenextepango, Cuautla

La región de la plataforma Guerrero Morelos está definida por una compleja historia tectónica, resultado de dos procesos geológicos principales: la orogenia Laramide del Cretácico Tardío (Campa *et al.*, 1976; Bird 1988; Dickinson *et al.* 1988, Salinas-Prieto 2000), y un evento magmático posorogénico durante el Cenozoico, que abarca el Terciario-Cuaternario (Ortega-Gutiérrez, 1980).

En la plataforma Morelos Guerrero, antes de efectuarse el depósito y plegamiento de las rocas marinas del Cretácico Tardío, hubo relieves altos de rocas metamórficas rodeados de mares someros que influyeron en la sedimentación y el proceso de plegamiento, donde posteriormente la orogenia Laramide formo pliegues con espesor, amplitud y longitud

distintas, el espesor de los depósitos también fue variable (Ortega-Gutiérrez, 1980). Como es el caso de las Formaciones Morelos y Cuautla, y también, en algunas partes la presencia de depósitos evaporíticos coadyuvó el desarrollo de fallas inversas posteriores, propiciando que las rocas metamórficas (precámbricas) cabalguen sobre las rocas Cretácicas, (Ortega-Gutiérrez 1980).

La variación en la orientación de los pliegues, en parte se asocia a la presencia de estos relieves altos que amortiguan la variación de la dirección de los esfuerzos de compresión Laramídicos, y en parte a los esfuerzos de fallas posteriores que afectaron la zona, que inclusive truncan la longitud y la continuación de los pliegues hacia el sur-sureste, y hacia el nor-noroeste. Las Formaciones Morelos y Cuautla afloran en Apaxco, Estado de México, indicando que posiblemente éstas continúan debajo del Eje Neovolcánico, sin embargo, en la ciudad de México, ambas formaciones fueron perforadas a 165 y 700 msnm, en los pozos profundos Tulyehualco I y Mixuca (Pérez-Cruz 1988), respectivamente, es decir, casi 1000 m por debajo su actual elevación en la zona de estudio lo que indica la presencia de una zona de falla (transtensional), a través de la cual surge el vulcanismo que formo el Eje Neovolcánico, (Cantagrel & Robin 1979; Shub& Cebull. 1984); o de una extensión continental relacionada con la subducción de las placas Coco-Norteamérica, Nixon (1982). Entonces, esta falla interrumpe la continuidad y la longitud hacia el noreste de estos pliegues cretácicos en diferentes sitios.

La interpretación tectónica - estructural de la zona, se hizo a partir del análisis de los rasgos estructurales y lineamientos observados en imágenes landsat y fotos aéreas, apoyados con mediciones y análisis de campo. Los lineamientos observados y trazados en las fotografías aéreas, se asocian a fallas y fracturas cuya orientación promedio predominante está entre NW 30° y 70 SE, los hay también de orientación NE 10° y 20° SW, y con una frecuencia menor en dirección W-E y N-S (Figura. 4.6).

Varios de los lineamientos dispuestos en dirección NW-SE, y E-W, se prolongan a nivel regional, afectando a unidades litológicas sedimentarias y volcánicas (De Cerna *et al.*, 1975; Aguayo y Marín 1987; Fries, Jr., 1960), originando en el relieve, laderas alineadas y bruscos cambios de pendiente. Dentro del área de este estudio, dichos lineamientos interrumpen la continuación del relieve calcáreo hacia sus extremos NW y SE, como es el caso de las fallas laterales Jojutla y Chinameca o el lineamiento Tepoztlan-Atotonilco, que forma el límite este de ésta zona y sobre el que surgió un cuerpo intrusivo de forma alargada (Figura. 4.6). Otro ejemplo es la falla Papalutla, ubicada al sur de Tepalcingo, que

es un rasgo muy notable de dirección NE-SW, y forma el límite meridional de la plataforma Morelos Guerrero, en la cual está la zona de estudio.

4.5.1 Estructuras locales

Las estructuras de esta zona consisten principalmente en pliegues, fallas y fracturas (Figura 4.6).

Durante el trabajo de campo se midieron y se cartografiaron algunos alineamientos, otros más se trazaron en la carta topográfica que sirvió para delimitar diferentes regiones donde se presenta mayor densidad de alineamientos, obteniéndose así cinco sub-regiones: 1) Ciudad Ayala, 2) Chinameca, 3) San Vicente de Juárez, 4) Tenextepango y 5) Jaloxtoc, cuyas tendencias se muestran en sus respectivas rosetas. La dirección predominante de alineamientos se muestra en la Figura 4.6.

Las sierras de Cuautla ubicadas en el sector W-NW del área de estudio son estructuras de pliegues anticlinales simétricos y asimétricos, dispuestos en una orientación NNW- SE; afectados por fallas de naturaleza diversa; en su parte media (frente Cuautla) los pliegues presentan rompimiento y desplazamiento horizontal en su extremo sur hacia el SE; los pliegues presentan una sensible curvatura hacia el E-SE (Figura 4.7). Regionalmente y de acuerdo con Fries Jr, (1960), parecen estar obedeciendo a lineamientos (fallas) en echelon de orientación NW-SE; y escalonada de SW a NE, en la región de Jojutla; esto implicaría una falla lateral izquierda y mientras que en el poblado Hacienda el Hospital se interpreta una falla sinistral al SE.

Hacia el poblado de Ahuehuevo, la sensible curvatura de la estructura calcárea hacia el sur, permite suponer el efecto de una falla lateral izquierda, que cruza la zona en dirección NE-SW, que Fries (1960) nombró falla lateral Chinameca; y que parece trincar los pliegues pues ya no continúan hacia el sureste; permitiendo suponer la existencia de una depresión tectónica (sección D-D').

En el sector de Tenextepango, la orientación predominante de los alineamientos es entre 20° y 70° al SW, y algunos al SE-SW (Figura 4.6).

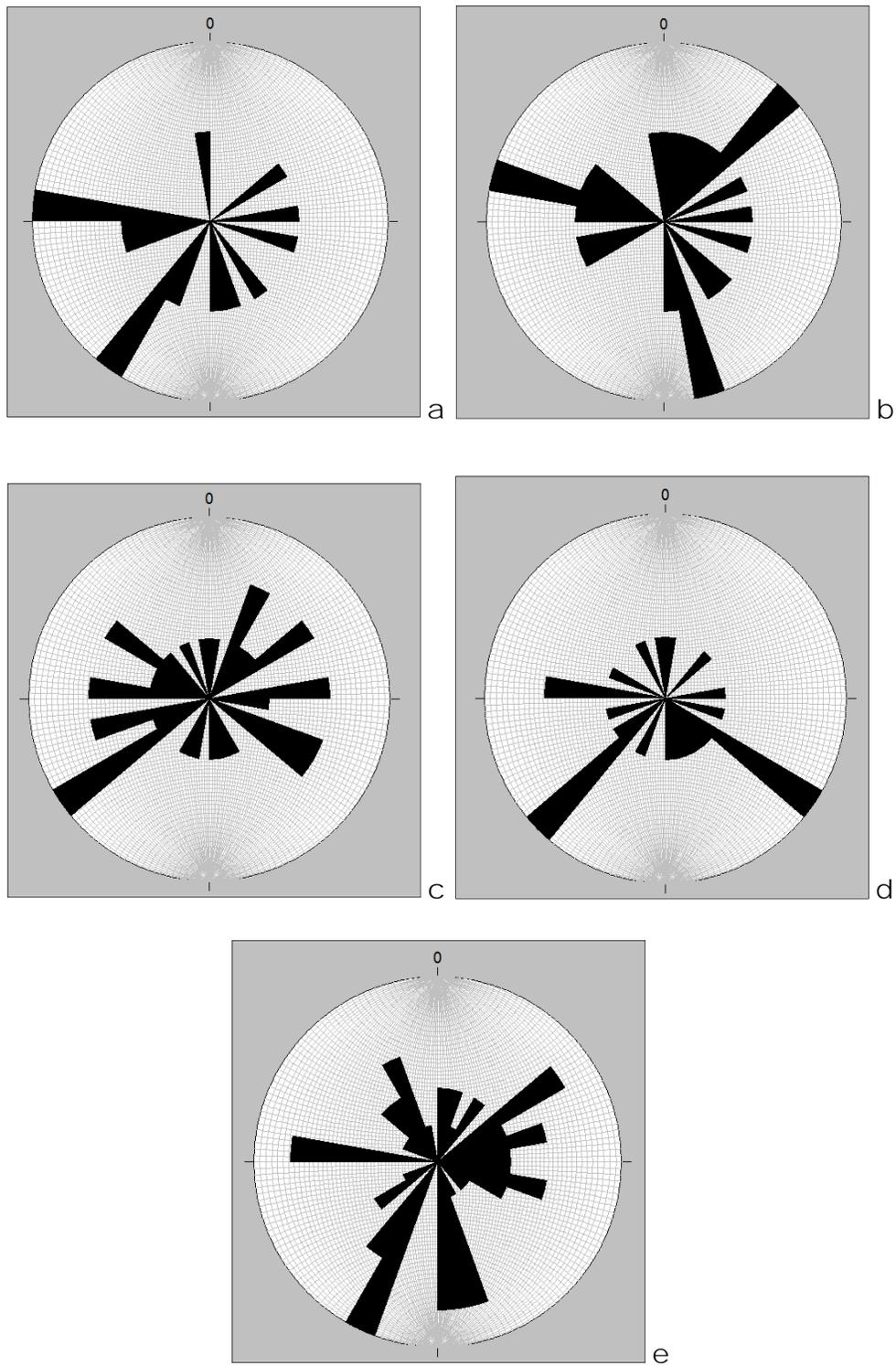


Fig. 4.6. Rosetas locales agrupadas en cinco zonas. Zona de Ciudad Ayala(a), al NW de la región, zona de Chinameca (b) ubicada al SW de la región, zona de San Vicente (c) situado al centro-oeste de la región, zona de Tenextepango (d), al norte y zona de Jaloxtoc (e) al este del área.

Lo anterior es un ejemplo de las numerosas fallas y fracturas que afectan a las rocas cretácicas, la mayoría de las cartografiadas, presentan movimiento lateral o conjugado, lateral- vertical, en ocasiones presentan planos inclinados hacia el NW y hacia el SW (Figura 4.7)

Los desplazamientos observados varían desde centímetros a decenas de metros, como sucede al noreste de Xalostoc y en la colonia Emiliano Zapata donde el Conglomerado Balsas está en discordancia sobre rocas volcánicas terciarias. El lineamiento NE-SW que pasa por Moyotepec, forma el límite sureste del relieve calcáreo. Asimismo, estas fallas también afectan a las rocas volcánicas, como se observa sobre la carretera San Vicente – Salitre, en la Sierra de Huautla, entre otros.



Fig. 4.7 Visión regional de las fracturas de la zona.

Otro caso es la falla normal Cañón de Lobos documentada por Fries Jr (1960), que al SW de Ayala pone en contacto horizontal las formaciones Morelos y Cuautla y junto con otras fallas forman una posible fosa tectónica que ocupa la planicie de Tenextepango.

Los lineamientos arriba descritos también son reconocibles en los materiales clásticos que constituyen el relleno de la planicie, ahí los continuos y bruscos cambios lineales de los cauces de los escurrimientos superficiales manifiesta la presencia de dichas estructuras. La Figura 4.7 y 4.8 muestra los lineamientos regionales a los que se asocia el arreglo estructural antes descrito, así como los lineamientos locales que seguramente son resultantes de los esfuerzos regionales.



Fig. 4.8 Afloramiento de ignimbrita de la Formación Tlaica (a) al oeste de San Vicente Juárez que muestra una falla lateral izquierda con azimuth de 225° (b).

El sector sur el relieve es esencialmente volcánico, ahí los lineamientos delimitan un gran bloque poligonal con límites rectilíneos que a su vez presenta varios bloques pequeños en su interior; este relieve salvo su interrupción por el Río Barranca la Cuera se extiende hasta el poblado de Loma Bonita. En el centro de la planicie fracturas con esta orientación NNE-SSW y NE-SW, determinan un relieve de forma alargada y favorecen la erosión de éste.

Dos de estos lineamientos; el Tepalcingo- Moyotepec y el Chinameca, forman el límite NE y NW respectivamente de la Sierra de Huautla. A través del segundo el Río Barranca la Cuera ha labrado su cauce.

El relieve volcánico, está fuertemente disecado por drenajes del tipo paralelo y rectangular, orientados de NE-SW, y N-S, desarrollado a través de dichos lineamientos (fallas), que imprimen un modelado de laderas y pendientes rectas, en detalle se observan numerosas fallas de desplazamiento lateral izquierdo cuya magnitud esta fuera del alcance del presente estudio. La Figuras 4.7 (b) muestra las principales familias de fracturas que afectan a las rocas de esta parte sur, se orientan entre 30° y 65° NW-SE, NE-SW.

En el sector oriente se tiene la presencia de un bloque ígneo-metamórfico, afectado por fracturas con orientación NE-SW y NW-SE, mismas que se prolongan fuera del área de estudio y definen un relieve de laderas rectilíneas. Los troncos ígneos están emplazados a través de un lineamiento de dirección NNW- SSE, y la orientación de los lineamientos predominantes varía de 30 NE a 70 SW (Figura. 4.7 e).

Los rasgos tectónicos que controlan el relieve de esta zona se agrupan en varias familias: la NW, se observan como fallas normales; las NE-SW, N- E, permiten la surgencia del vulcanismo de la zona de Huautla, hay sectores donde la dinámica de los lineamientos N-S, es poco evidente. Finalmente se interpreta que los lineamiento E-W, se asocian con la reactivación que origino el Eje Neovolcánico y afectan a todos los otras lineamientos.

Todas estas fallas locales y regionales, está relacionadas con la geodinámica que impero en esta región desde el Cretácico Tardío y cuyas direcciones y magnitud de esfuerzos ha variado sensiblemente (Ortega-Gutiérrez, 1993; De Cserna *et al.*, 1987).

Conocer y establecer la presencia de estos lineamientos es importante, pues ayuda a establecer las estructuras que constituyen los cuerpos de rocas y a su vez los diferentes acuíferos. En este caso, permiten interpretar que la planicie es una depresión tectónica cuyo relleno corresponde a una alternancia de rocas clásticas y duras.

V. METODOLOGÍA

Para cumplir los objetivos propuestos en esta investigación, fue necesario, en primera instancia, recopilar y analizar la información bibliográfica existente en universidades y oficinas de gobierno; consulta de fotografías aéreas y cartas topográficas editadas por el INEGI (Escala: 1:50 000). Compilación y análisis de datos meteorológicos e información técnica de los pozos de la zona.

Las diferentes acciones realizadas quedan agrupadas en actividades de campo, gabinete y laboratorio que en seguida se explican.

5.1 ANÁLISIS DE DATOS METEOROLÓGICOS

Para conocer las características climatológicas se realizó el análisis estadístico de datos meteorológicos del área de estudio y la ubicación exacta de las estaciones climatológicas.

Los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional tenían algunos errores de captura, y carecían de algunas estaciones climatológicas; la información faltante, se consultó en la base de datos ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica), en ella se obtuvieron los faltantes y también, fue posible verificar y corregir los datos.

Una vez corregidos los errores, la información meteorológica se utilizó para determinar los valores medios mensuales y anuales de temperatura, precipitación y evaporación, debido a que esta última representa un valor potencial, fue sustituida por la evapotranspiración.

El valor de la precipitación media de la región de estudio, se obtuvo mediante el método de los polígonos de Thiessen del periodo 1990-2000, (Fórmula 5.1); el valor de la evapotranspiración real anual que se calculó por medio de la ecuación de Turc (Fórmula 5.2) (Custodio y Llamas, 1983).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i a_i)}{\sum A} \quad (5.1)$$

Donde:

P = altura precipitada buscada sobre la cuenca en mm.

p_i = lluvia del polígono i en mm.

a_i = área del polígono i en km^2

A = superficie total de la cuenca en km^2

$$ETr = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (5.2)$$

En donde:

ETr: es la evapotranspiración real anual en mm.

P: es la precipitación anual en mm.

L: es igual a $0.05t^3 + 25t + 300$. Donde t: es la temperatura media anual en °C.

Finalmente, se configuro la distribución espacial de temperatura y precipitación y evapotranspiración en la región de estudio (Figura 3.2).

5.2 CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

Con base en las cartas topográficas y la bibliografía consultada, se realizó el reconocimiento geológico a través de una etapa de campo que consistió en efectuar caminamientos con el objetivo de reconocer las formaciones geológicas citadas en la literatura, identificar unidades estructurales mayores como pliegues, fallas y su dirección,

colectar muestras representativas de roca para análisis petrográfico y geoquímico, identificar contactos litológicos y hacer mediciones estructurales. También se determinaron las características de las formas de relieve, diferenciando así la forma de la planicie y su extensión, los plegamientos, estructuras volcánicas, derrames, etc.; con el objetivo de visualizar los procesos endógenos y exógenos que predominan en el área de estudio.

Cabe destacar, que durante el trabajo de campo la actividad a la que se hizo énfasis fue el delimitar lo mejor posible las diferentes litologías que integran el Grupo Ixtlico; del cual Fries (1960), únicamente menciona los tipos de roca que lo integran, delimita las áreas más no las cartografió a detalle, cosa que para este trabajo fue importante conocer la superficie que ocupan cada una de ellas.

5.3 SONDEOS GEOFÍSICOS

Para conocer la litoestratigrafía del subsuelo, se utilizó como herramienta de apoyo el método geofísico conocido como Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), que consiste en hacer pasar una corriente de determinada intensidad en el subsuelo y medir la resistividad de las rocas, y con ello su ubicación en profundidad.

Se utilizó una espira o bobina que está formada de un cuadro mediante cable del # 10 con dimensiones de 150 x 150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "Single Loop", con una resistencia de 3 Ohms en el circuito, para lo cual se utilizó un cable especial. Con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente del orden de los 6 amperes, esto para cumplir con los 600 m de profundidad. El equipo empleado fue un Sirotem MK3 con número de serie 2332.

Para este estudio se realizaron dos sondeos y se ubicaron casi en los extremos oeste y este de la planicie (Figura 4.2), posteriormente se hizo la correlación de la litoestratigrafía reportada en los sondeos.

5.4 TRABAJO DE GABINETE.

Se elaboró un mapa geomorfológico con el software ER- Mapper 6.4®, basado en observaciones del relieve (Mapa 2).

Con los datos geológicos obtenidos en campo, se realizó el mapa geológico, utilizando el software Autocad 2004® para representar la distribución de las unidades geológicas en superficie, las relaciones estratigráficas y estructurales y las estructuras geológicas que afloran en el área de estudio (Anexo A).

Una vez concluido el mapa, se realizaron 4 secciones geológicas, para hacer una configuración del subsuelo y conocer las relaciones estructurales y estratigráficas de las unidades litológicas del área.

Las secciones A-A', B-B' y C-C', cruzan el área de estudio en dirección E-W, mientras que la sección D-D' la cruzan en dirección NE-SE (Ver Anexo A).

Para el análisis de datos estructurales, se realizaron rosetas de fracturas a través del programa Stereo Net y así poder visualizar la dirección de los esfuerzos dominantes del área. En el caso de las fallas, se realizó su medición en campo para identificar esfuerzos locales y lineamientos regionales y con esto, poder realizar la descripción de la Geología Estructural de la zona.

5.4.1 Clasificación de muestras de roca

A las muestras consideradas como representativas o en las que se tuvo dificultad para clasificar en campo, se les hizo un análisis petrográfico mediante una lámina delgada, dichas láminas se elaboraron en Petroanálisis S.A de C.V. En total se analizaron y clasificaron 29 muestras, el estudio petrográfico se llevó a cabo en el Laboratorio de Petrología del Instituto de Geología de la UNAM; las descripciones obtenidas se muestran en el Anexo B y la distribución geográfica de las muestras se observa en la figura 5.1.

Por otra parte, se seleccionaron 25 muestras de roca para análisis geoquímico con base en su distribución y con el objetivo principal de conocer su contenido de fluoruro, además de conocer su clasificación. Estas muestras incluyen a las muestras que fueron utilizadas en el experimento agua-roca, el cual se explica a continuación.

5.5 MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Una vez elaborado el marco físico preliminar, se programaron visitas de campo para obtener muestras de agua en pozos y en manantiales que abastecen de agua potable a la población, ubicados dentro del área de estudio. La selección de los pozos se hizo en coordinación con el Sistema Operador de Agua Potable y Saneamiento (SOAPSA) del municipio de Ayala, en base a las facilidades que éste proporcionó para realizar el muestreo y medir parámetros de campo en los pozos. En total se obtuvieron 28 muestras de agua (20 en pozos y 8 manantiales) (Figura 5.1). Los puntos de muestreo fueron referenciados con un GPS Brunton.

El muestreo de agua subterránea comprende cuatro aspectos importantes: i) actividades previas a la salida al campo, ii) cuidados durante el trabajo de campo (técnicas de toma de muestra), iii) precauciones para el traslado de muestras al laboratorio, y iv) técnicas de análisis de laboratorio.

Las muestras de agua recolectadas se tomaron por duplicado y se analizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM y en el laboratorio ACTLABS en Canada, se analizaron cationes y aniones.

El Tritio se analizó en la Universidad de Waterloo, Canadá, y los isotopos estables Deuterio y Oxígeno 18 en la Universidad de Arizona.

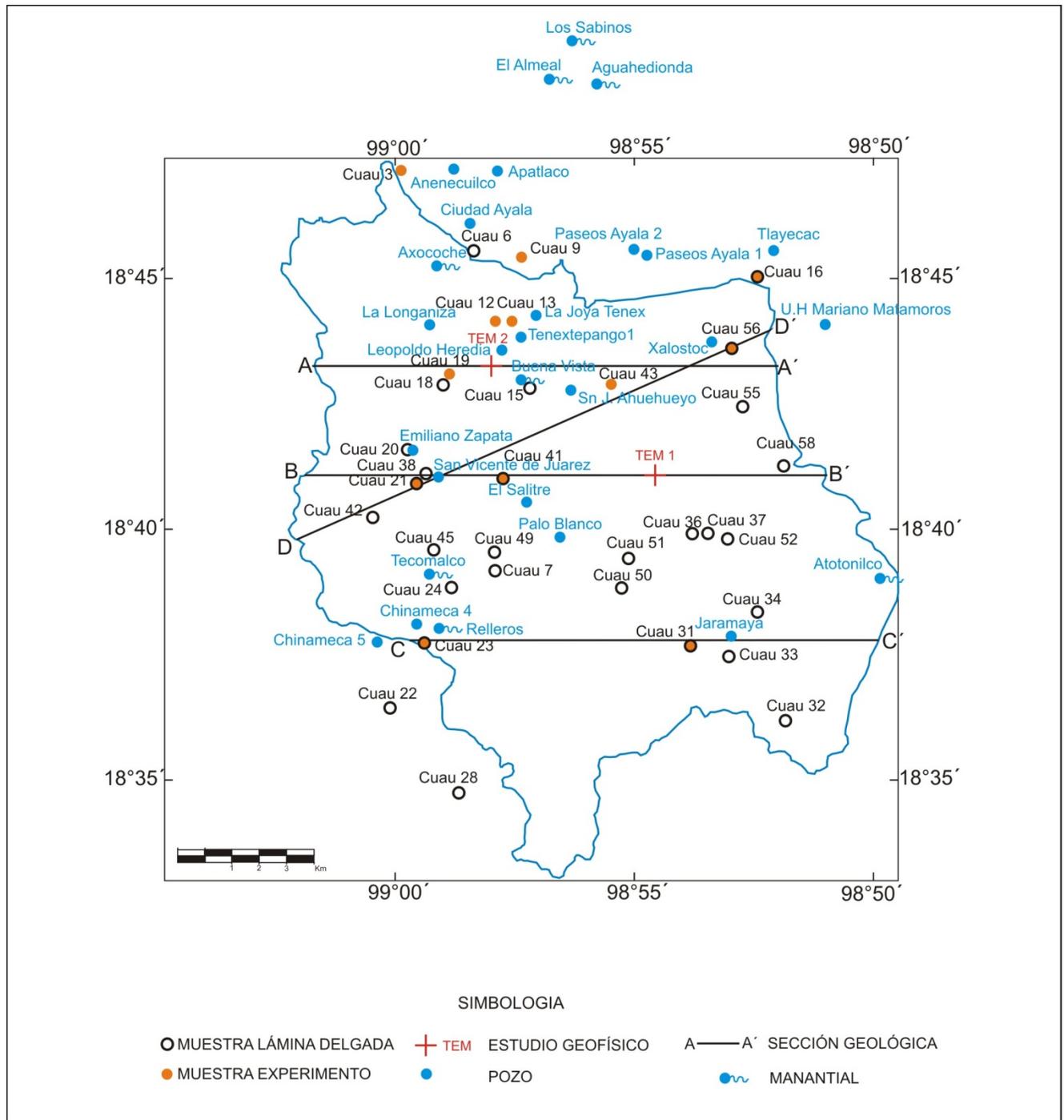


Fig. 5.1 Ubicación de los sitios donde se obtuvieron muestras de agua para análisis químico e isotópico; muestras de roca para lámina delgada y para el experimento de interacción agua-roca, también se ubican las secciones geológicas y los sondeos geofísicos.

5.5.1 Actividades previas a la salida al campo

La programación del muestro consistió en planear anticipadamente la cantidad y tipo de muestras a coleccionar y los parámetros químicos a determinar para cada una, el material, equipo, reactivos y documentos necesarios para realizar el muestreo. Los parámetros de interés a cuantificar en las muestras fueron: cationes, aniones e isótopos estables, Tritio para algunas muestras.

La toma de muestras se realizó en el mes de septiembre de 2008 y se muestrearon 28 sitios, previamente ubicados en la carta topográfica. El material a utilizar y el equipo necesario para esta actividad se enlistan en el anexo C.

5.5.2 Procedimiento para el muestreo

Las botellas se lavaron perfectamente con detergente y se enjuagaron con agua potable y finalmente con agua destilada.

Considerando que es muy recomendable evitar la toma directamente de la descarga del pozo, se adapta una manguera de la válvula de descarga del pozo a un recipiente donde se tomará la muestra. Se deja fluir el agua 8 minutos antes de tomar la muestra, controlando el flujo en la manguera para evitar turbulencia al interior del frasco, (Appelo and Postma, 1993; Edmunds, 1981; Keith 1992; Sutarndo and Steger,1985; Cardona-B 2000), que llegara a ocasionar la entrada o salida de gases, burbujas de aire dentro de la botella (Figura 5.2).



(a)



(b)

Fig. 5.2 Manguera adaptada a la válvula de descarga del pozo (a). Celda para medir parámetros físicos y recipiente de donde se tomarán las muestras (b).

En el momento de la toma de agua, el envase se enjuagó tres veces con el agua a muestrear y después se procedió a llenarlo completamente

La Tabla 5.1, muestra el volumen de agua requerido de acuerdo al parámetro a analizar, así como las condiciones en que debe quedar la muestra (filtrada o no, con conservador o no). En la Tabla C1 del Anexo C, se indican los parámetros físico-químicos que se deben registrar en campo durante la toma de la muestra.

Tabla 5.1 Características del muestreo de acuerdo al parámetro a analizar.

PARÁMETRO A ANALIZAR	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
TRITIO	POLIETILENO	500 ml	Ninguno	NO
ANIONES	POLIETILENO	250 ml	Ninguno	NO
METALES	POLIETILENO	250 ml	HNO ₃	NO
ICP (aniones)	POLIETILENO	60 ml	Ninguno	SI
ICP (metales)	POLIETILENO	60 ml	HNO ₃	SI
ISOTOPOS	POLIETILENO	60 ml	Ninguno	NO

Es importante señalar que se debe poner especial cuidado en el seguimiento de las indicaciones señaladas en la Tabla 5.1 y en el llenado del formato C1 del Anexo C, para obtener resultados lo más confiables que sea posible.

En los pozos donde existe cloración del agua, se interrumpía ésta, mientras era tomada la muestra de agua y finalmente, los frascos se etiquetaron.

Cuando el muestreo se lleva a cabo en un manantial, si es posible, se coloca un tubo en el manantial para canalizar el agua y facilitar la toma de muestra. Siguiendo los pasos señalados para la toma en un pozo.

En el área de estudio, la muestra se tomó directamente del manantial, antes, fue necesario lavarse muy bien las manos, enjuagándolas con alcohol, posteriormente, se colocó el frasco boca abajo introduciéndolo al agua, sumergiéndolo y llenándolo, se tapó el frasco sin sacarlo del agua. Las muestras se mantuvieron a temperatura de 4 °C hasta el momento de su análisis.

5.6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

La medición de parámetros *in situ* es muy importante, ya que son representativos de las condiciones naturales en las que se encuentra el agua en el acuífero, además de proveer parámetros de control de las mediciones posteriores hechas en laboratorio.

Los parámetros de campo que se midieron fueron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, potencial redox (Eh), oxígeno disuelto y alcalinidad. La medición de los parámetros de campo se efectuó por medio de una celda de aislamiento de flujo continuo, la cual se muestra en la figura 5.3.

Esta celda se conecta a la manguera que sirve de extensión a la válvula de descarga del pozo, posteriormente se introducen los electrodos para el registro.



Fig. 5.3 Celda de aislamiento de flujo continuo para medición de parámetros de campo

5.6.1 Temperatura

La temperatura siempre debe ser el primer parámetro observado, pues tanto el pH, como la conductividad eléctrica dependen de su valor. Se midió con un potenciómetro portátil marca OAKTON.

5.6.2 pH

La medición de pH en el agua subterránea se realizó con el potenciómetro OAKTON; la calibración se hizo conforme a la técnica de dos puntos conocidos (soluciones *buffer*), en donde el pH a registrar debe de ubicarse entre dichos extremos. Para ello se utilizaron soluciones de las cuales se conoce previamente su pH de 4.0, 7.0 y 10 unidades.

Una vez calibrado el equipo, se sumerge el electrodo en la celda de aislamiento, registrando las lecturas del pH en forma continua a partir del inicio de la prueba y se registran las lecturas cada 5 minutos aproximadamente.

5.6.3 Potencial redox (Eh)

Las mediciones de Eh en las muestra se realizaron con el potenciómetro portátil marca OAKTON. Las mediciones se realizaron introduciendo el electrodo dentro de la celda de flujo continuo, evitando en lo posible el contacto con la atmósfera, para que la lectura no se vea afectada por la disolución de oxígeno atmosférico.

Teóricamente, el Eh determina la distribución de todos los equilibrios redox en forma similar a como el pH expresa la distribución de todos los equilibrios ácido-base. Pero a diferencia del pH, en la mayoría del agua natural el Eh, no puede ser medido inequívocamente.

Lo que interesa es conocer el potencial que se registraría con el electrodo estándar de hidrógeno. Sin embargo, como es poco práctico llevar a campo éste último, entonces, se utiliza un electrodo de referencia de potencial conocido y los potenciales medidos se tienen que ajustarse al valor que se obtendría con el electrodo estándar de hidrógeno, de acuerdo con la siguiente fórmula 5.3:

$$E_h = E_{camp} + E_{ref} \quad (5.3)$$

Donde:

E_h = Potencial redox

E_{camp} = potencial medido en campo

E_{ref} = valor del electrodo de referencia

Para este estudio las lecturas fueron registradas con un electrodo de referencia que posee un sensor constituido de cloruro-plata (Ag/AgCl). El valor estándar del factor de corrección para este tipo de electrodo según Vepraskas *et al.* (2002), es + 200 mV.

5.6.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos se midieron utilizando un conductivímetro portátil marca WALK LAB, que utiliza el ajuste por temperatura y puede medir desde $0\mu\text{S}$ hasta 199.9 mS. El registro continuo durante las pruebas de extracción permite identificar la evolución de la calidad del agua extraída y proponer cuando es conveniente la toma de muestras de agua subterránea para su análisis detallado. Previo a la salida al campo se calibró el conductivímetro, con una solución de NaCl 1000 ppm.

5.6.5 Alcalinidad

La alcalinidad es una propiedad del agua para neutralizar un ácido fuerte, la alcalinidad de un agua depende de su contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Considerando que una vez tomada la muestra la alcalinidad puede cambiar con el tiempo, entonces es recomendable medirla directamente en campo. Para esto se recurrió a la técnica de titulación con ácido clorhídrico, empleando fenolftaleína o anaranjado de metilo como indicadores de los puntos de equivalencia.

En campo, se llevó a cabo el procedimiento de la siguiente forma: en un matraz se agregó un volumen (alícuota) de 30 ml de muestra de agua medido con pipeta, posteriormente se agregaron 5 gotas (0.25 ml) de indicador (fenolftaleína o anaranjado de metilo). Se coloca el matraz en el soporte universal y se prepara una bureta con ácido clorhídrico (HCl) diluido al 10% (figuras 5.4 a y b); se agregan poco a poco gotas en la muestra, agitando constantemente el matraz, hasta que el color deviene rosa; momento en el cual, se asume que la solución tiene un pH entre 4.5 y 4.8.

La fórmula para calcular la alcalinidad es la siguiente.

$$\text{Alcalinidad a la fenoftaleina} = \frac{A \cdot N \cdot 50000}{Va} \quad (5.4)$$

$$\text{Alcalinidad Total } \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de CaCO}_3 = \frac{A_1 \cdot N \cdot 50,000}{Va \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de CaCO}_3} \quad (5.5)$$

En donde:

N = normalidad del ácido

A = vol. de ácido empleado para titular con fenoftaleina

A₁ = vol. de ácido empleado para titular con verde de bromocresol

Va = volumen de muestra analizada.



(a)



(b)

Fig. 5. 4. Procedimiento de titulación en el campo.

Los datos obtenidos en la titulación se deben registrar en un formato (segundo apartado del Anexo C).

5.6.6 Registro de datos constructivos e hidrodinámicos en pozos

Una vez en el pozo donde se tomará la muestra, se registran los siguientes datos: i) profundidad total, ii) diámetro de perforación iii) longitud del ademe ranurado, iv) longitud

de tubería lisa, v) longitud y diámetro de la columna de bombeo y descarga, vi) tipo de bomba (vertical, sumergible), vii) régimen de operación, viii) corte litológico.

Los datos hidrodinámicos que se tomaron fueron: i) profundidad al nivel estático, ii) profundidad al nivel dinámico, iii) caudal de extracción.

Con la información de los niveles estáticos, se hicieron las interpolaciones necesarias para obtener una carta de isopiezas en la zona para mostrar la variación y dirección del gradiente hidráulico.

5.6.7 Pruebas de bombeo

Antes de iniciar la prueba de bombeo, se registra la elevación del nivel estático del agua subterránea en el pozo.

Al iniciar el bombeo de agua, se comienza a registrar cuidadosamente el descenso del nivel del agua con respecto al tiempo, así como la medición de la temperatura, pH, potencial redox y conductividad eléctrica. Estos parámetros se registran en intervalos de 5 minutos, por lo menos el tiempo que dure la prueba de bombeo, la prueba concluirá una vez que el pozo se haya abatido por completo.

Durante las pruebas de bombeo se realizaron mediciones del abatimiento del nivel del agua vs tiempo, complementados con tomas de muestras de agua subterránea, lo cual permite identificar variaciones en la calidad del agua extraída así como la conductividad hidráulica y la transmisividad del acuífero.

5.7 CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Con el objetivo de conocer el contenido químico, de isótopos estables y tritio en el agua de lluvia de la región de interés, se ubicaron tres estaciones para captar el agua de lluvia durante el periodo húmedo de 2009, (meses de junio a septiembre), y con ello de poder interpretar la ubicación de áreas de recarga y de descarga. El agua captada, también se empleó en el experimento de interacción agua-roca que se explica más adelante. Las estaciones se prepararon en el laboratorio de isótopos estables del instituto de Geología de la UNAM y consistían en recipientes cerrados de plástico con un orificio por donde entra

el agua a través de un embudo cubierto con una malla que funge como filtro para evitar la entrada de partículas de tamaño mayor a 5 mm aproximadamente. Todo el cuerpo del recipiente va forrado con capas del material conocido como “bajo alfombra” y papel aluminio, se les introdujo aceite mineral vegetal para crear una capa que evita la evaporación del agua y posteriormente se montaron en una caja de madera que funciona como soporte; finalmente se pintaron de color blanco para reflejar, en la medida de lo posible los rayos del sol y evitar que se caliente demasiado el recipiente (Figura 5.5).

La primera estación se ubicó en Tenextepango, con coordenadas 18°43.847, 98°57.461 y una altitud de 1158 m (Figura 3.1), este sitio se seleccionó debido a que en este poblado se presentan casos más severos de fluorosis en la población y se asume que ahí llega el flujo de la recarga.

Las siguientes estaciones se ubicaron fuera del área de estudio, hacia el lado noreste, estos sitios se seleccionaron debido a que son zonas topográficamente altas, por lo que se infiere que ahí es una zona de recarga.

Una estación se ubicó en el poblado de nombre San Andrés Ocuituco, con coordenadas 18°52.917, 98°45.861, con una altitud de 1939 m. La tercera estación se colocó en el cerro Xonacayocan con coordenadas 18°54.291, 98°40.372 con altitud de 2490 (Figura 5.1).

Al finalizar la temporada de lluvia, las estaciones fueron desinstaladas de los sitios y posteriormente fueron llevadas al laboratorio de Química de Agua del Instituto de Geología de la UNAM, donde fue retirada el agua con cuidado de no mezclarla con el aceite que la cubría. Posteriormente se le tomaron lecturas de temperatura, conductividad eléctrica y pH y finalmente se depositó en botellas de polipropileno para su análisis químico.



Fig. 5.5 Estación para captar agua de lluvia

5.8 EXPERIMENTO DE INTERACCIÓN AGUA-ROCA

Se seleccionaron 12 muestras de roca para experimento de disolución de roca en agua, la selección se hizo considerando que las muestras correspondieran a diferentes litologías, y procurando que estuvieran distribuidas de manera uniforme en el área de estudio (Figura 5.1).

5.8.1 Montaje del experimento

Las muestras se trituraron para lograr dos tamaños de granulometría, una de grava gruesa y la otra de arcilla. Enseguida se prepararon 48 recipientes de polipropileno de la siguiente forma: a 24 se les agregó 180 ml de agua destilada de los cuales, en 12 de ellos, se depositaron 50 g de fracción grava y en los otros 12, 50 g de fracción arcilla. Después se prepararon otros 24 recipientes de la misma manera, 12 con 50 g de fracción grava y 12 con 50 g de fracción arcilla, pero en este caso, se les agregó agua de lluvia captada en la estación de Tenextepango. Las cantidades de soluto vs solvente, se seleccionaron con el objetivo de recuperar suficiente muestra de agua al final del experimento.

El experimento se realizó en el Laboratorio de Química de Agua del Instituto de Geología de la UNAM, el tiempo de interacción agua-roca fue de 72 días, se consideró dicho periodo de tiempo, ya que Saxena and Ahmed (2001) realizaron un estudio similar por un

mes, tiempo que se considera como mínimo necesario para llevar a cabo la disolución mineral. Las muestras se agitaron diariamente a 120 revoluciones por minuto, por periodos de 20 minutos, como se muestra en la Figura 5.6a. El proceso de lixiviación se llevó a cabo a presión y temperatura ambiente (de 15 a 23 °C), se tomó diariamente el registro de la fecha, hora de agitación y temperatura ambiente.

5.8.2 Material, equipo y soluciones empleados en el experimento:

- ♦ 50 gr en tamaño grava y 50gr en tamaño arcilla de cada muestra seleccionada
- ♦ 48 recipientes de polipropileno
- ♦ 1 balanza electrónica de precisión
- ♦ 1 Probeta calibrada
- ♦ Matraz Erlen Meyer
- ♦ 180 ml de agua (destilada y de lluvia)
- ♦ 1 Termómetro
- ♦ 1 Conductivímetro
- ♦ Un potenciómetro
- ♦ 1 agitador mecánico
- ♦ 1 Bomba de vacío
- ♦ 1 Embudo
- ♦ Papel filtro de 0.45 μm
- ♦ Fibra de vidrio

Después de 72 días se desmontó el experimento, tomando las lecturas de pH y conductividad eléctrica del agua antes de ser filtrada.

La separación del agua del sedimento, se llevó a cabo mediante el proceso de filtración desecación por vacío, que consiste en conectar una bomba a un matraz Erlenmeyer, a éste se le coloca un embudo cubierto con un filtro de 0.45 μm y fibra de vidrio, el recipiente

queda parcialmente cerrado y se crea un vacío, así la bomba alcanza a succionar el líquido y separarlo de la fracción sólida, especialmente arcillas, para nuestro experimento. La figura 5.6b, muestra el arreglo antes descrito.



(a)



(b)

Fig.5.6 Experimento de interacción agua-roca, agitado diariamente por periodos de 20 minutos (a). Separación de agua-roca por filtración de dececación por vacío (b)

Finalmente se midió el volumen de agua recuperado y se almacenó en botellas de polipropileno para hacer los análisis de laboratorio correspondientes, con el fin de detectar contenido de flúor, aniones y metales.

5.9 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO.

5.9.1 Análisis geoquímico de rocas

Los análisis geoquímicos de elementos mayores y elementos traza se realizaron por el método fluorescencia de rayos X. Las muestras fueron analizadas en base seca, los elementos mayores se midieron en perlas preparadas con una dilución de 0.45g:9g, relación muestra:fundente. Los elementos traza se midieron en muestra prensada con 10% de cera-C micropolvo como aglutinante.

El flúor se detectó mediante análisis cuantitativo por longitud de onda de energía dispersada de rayos X con Microsonda Electrónica de Barrido JEOL, JXA-R 8900 (LUP). Se realizaron seis lecturas aleatorias por cada muestra y se obtuvo el promedio.

5.9.2 Análisis Químicos de Agua

Las muestras de agua fueron tomadas por duplicado y se mandaron a analizar en el laboratorio ACTLABS y en Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología para cationes y aniones.

Se realizaron análisis químicos de Tritio, Deuterio y Oxígeno 18 para el agua de lluvia colectada en zonas de recarga y para algunas de las muestras colectadas en pozos y manantiales. Los análisis se realizaron en la Universidad de Waterloo, Canadá para el Tritio y en la Universidad de Arizona para Deuterio y Oxígeno 18.

Por último se mandó a analizar el agua de lixiviado del experimento, se determinaron cationes y aniones. Esto se hizo en el Laboratorio de Radioactividad Natural del Instituto de geofísica

5.9.2.1 Determinación de aniones

El contenido de CO_3^{2-} y HCO_3^- se analizó en las muestras sin conservador, en el laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología. Se obtuvo por el método de titulación de acuerdo a ASTM D 1067-92, Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, publicado por la APHA (1989).

Los demás aniones se determinaron mediante la técnica de Cromatografía de líquidos, utilizando un equipo Waters con detector de conductividad. Se utilizó una columna de separación IC-Pak (4.6 x 50 mm) que identifica seis aniones: Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{2-} y SO_4^{2-} . Los análisis se efectuaron en el laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, UNAM. Los límites de detección se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Límites de detección de aniones por el método Cromatografía de líquidos

Anión	Concentración (ppm)
Cl ⁻	0.65
Br ⁻	1.03
NO ₂ ⁻	1.14
NO ₃ ⁻	1.17
PO ₄ ²⁻	0.89
SO ₄ ²⁻	1.79

El contenido de aniones además del contenido de fluoruro de estas muestras, se realizó en los laboratorios ACTLABAS, donde se analizaron por ICP-MS y para el caso de fluoruros por Cromatografía de iones. Los límites de detección se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Límites de detección de aniones para el método Cromatografía Iónica

Anión	Concentración (mg/L)
Fl ⁻	0.03
Cl ⁻	0.03
Br ⁻	0.03
NO ₂ ⁻	0.01
NO ₃ ⁻	0.01
PO ₄ ²⁻	0.02
SO ₄ ²⁻	0.03

5.9.2.2 Determinación de Cationes

Los cationes también se analizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, en las muestras acidificadas. El análisis de Na⁺ y K⁺ se realizó mediante la técnica analítica de Flamometría, utilizando un equipo Corning 400 y estándares de calibración de 0, 0.5, 1.0, 1.5 y 20 ppm para el K⁺ y 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 ppm para el Na⁺.

El análisis de Ca^+ , Mg^+ se llevó a cabo mediante Espectrometría de Absorción Atómica en flama, marca Perkin Elmer 3100 utilizando acetileno y óxido nitroso para atomizar la muestra y estándares de calibración de 0, 0.5, 1, 2, 3 y 4 ppm para Ca^+ y 0, 0.3, 0.5 y 0,7 ppm para Mg^+ .

Los límites de detección con los que se determinaron los análisis se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Límites de detección de aniones con el método Espectrometría de Absorción Atómica

Anión	Concentración (ppm)
Na^+	0.11
K^+	0.22
Mg^+	0.09
Ca^+	0.15

También se determinaron aniones en el laboratorio ACTLABS, donde fueron analizados por el método ICP-MS. Los límites de detección utilizados por este laboratorio se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Límites de detección de aniones con el método ICP-MS

Anión	Concentración ($\mu\text{g/L}$)
Na^+	5
K^+	30
Mg^+	2
Ca^+	700

Para comprobar la relativa exactitud de los resultados de los análisis químicos se utilizó la técnica del balance iónico o condición de electroneutralidad, fundamentada en la neutralidad eléctrica de las muestras de agua. La técnica utilizada para realizar el balance iónico consiste en calcular el total de cargas de aniones y cationes reportados por el

laboratorio. Teóricamente, en un análisis correctamente realizado el valor calculado para los aniones deberá ser muy similar al de los cationes.

El total de cargas positivas (cationes) y negativas (aniones) se obtiene sumando los equivalentes correspondientes. El error de balance iónico se expresa por la diferencia como un porcentaje de la suma, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\%Error = \frac{(\sum cationes - \sum aniones)}{(\sum cationes + \sum aniones)} \times 100 \quad (5.5)$$

De acuerdo con Freeze y Cherry (1979) los análisis que se consideran correctos son los que presentan un porcentaje de error menor al 10%.

Posteriormente, se obtuvieron diagramas de Piper y de Stiff para conocer el tipo de agua de cada aprovechamiento muestreado.

Cabe señalar, que, como el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, entregó los resultados en unidades ppm (tablas 5.2 y 5.1), se llevó a cabo la conversión a mg/L, por lo que en los resultados de las muestras de agua del lixiviado del experimento agua-roca, las cantidades son muy pequeñas.

Con respecto a los resultados de fluoruro, se realizó la configuración de isolíneas de los contenidos de dicho elemento para conocer su distribución espacial en la zona de interés.

5.9.2.3 Determinación de tritio

Se determinó por la técnica de Espectrómetro de Centelleo Líquido (LSC), en la Universidad de Waterloo, Canadá. Los resultados de los análisis se reportaron en unidades de tritio (UT).

5.9.2.4 Isotopos estables Deuterio y Oxigeno 18

Los análisis de isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ se analizaron en el laboratorio de Isótopos de la Universidad de Arizona. La técnica empleada fue Espectrometría de Masas. Posteriormente se comparó su abundancia relativa en función de un estándar de referencia (SMOW, PDB, VSMOW, etc). Los resultados se reportaron en valores delta (δ).

VI. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

6.1 HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

De acuerdo con la CONAGUA (2002), la zona de estudio pertenece al acuífero Cuautla-Yautepec, ubicado en la porción centro- norte del Estado de Morelos, cubriendo las partes bajas de los valles de Cuautla y Yautepec y colindando en la porción Norte con la Cuenca Hidrológica del Valle de México, al Oeste con el acuífero Cuernavaca y Zacatepec, al Este con el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan en el Estado de Morelos y al Sur con la cuenca del río Amacuzac, en el estado de Morelos y Guerrero. Para este acuífero se define una extensión territorial de 2,231.22 Km².

El acuífero está constituido por uno o varios tipos de roca que se agrupan como unidades hidrogeológicas. La primera unidad hidrogeológica, definida también como acuífero libre, se ubica en materiales de las formaciones Tlayecac, Depósitos Clásticos Continentales y Formación Chichinautzin. Las dos primeras de regular permeabilidad y de tipo granular mientras que la tercera de alta permeabilidad y de tipo fracturado. Sobre estos materiales se encuentran alojadas las obras de captación que explotan las aguas del subsuelo mediante pozos profundos y norias en el estado de Morelos. Este acuífero tiene además importantes descargas naturales mediante manantiales.

La Formación Tlayecac y los Depósitos Clásticos Continentales en los valles de Yautepec y Cuautla presentan espesores promedio de 150 metros; la Formación Chichinautzin en la porción norte presenta espesores que rebasan los 300 metros, determinando su espesor la ubicación respecto al valle (CONAGUA, 2002).

La segunda unidad hidrogeológica, definida como un acuitardo, se asocia con los materiales del Grupo Balsas y la Formación Mexcala, materiales que tienen la capacidad de almacenar agua pero no fácilmente la ceden. El Grupo Balsas y la Formación Mexcala se localizan a profundidades del orden de 150 metros, en la porción norte de Oaxtepec y al poniente de Cuautla.

La tercera unidad hidrogeológica se encuentra debajo del Grupo Balsas y la Formación Mexcala. Se encuentra semiconfinada y se aloja en materiales calizos de las formaciones Morelos y Cuautla, siendo además el basamento de la secuencia hidrogeológica. El agua subterránea se conduce a través de fallas, fracturas o zonas de disolución y se manifiesta y explota únicamente en la porción del valle de Yautepec por la descarga natural del manantial Las Estacas (CONAGUA, 2002).

En cuanto a la piezometría, un estudio realizado por INRA, S.A.(1996), define que la elevación del agua subterránea en la parte alta del valle se encuentra a 1,550 msnm descendiendo hasta los 960 msnm en la parte de Ticumán. El agua circula en el subsuelo de la zona, de noreste a suroeste y de este a oeste, esto es de la sierra Nevada hacia las porciones sur de Cuautla y de la cañada de Yautepec. La dirección dominante de flujo es norte-sur. El gradiente hidráulico del flujo es de 0.09 a 8.3×10^{-3} (INRA, S.A., 1996).

6.2 HIDROGEOLOGÍA LOCAL

6.2.1 Unidades Hidrogeológicas de la Zona de Tenextepango-Tepalcingo, Cuautla

De acuerdo con las propiedades litológicas, petrofísicas e hidrodinámicas de las diferentes unidades de roca y depósitos no consolidados de la planicie de Tenextepango, éstas constituyen las dos siguientes unidades hidrogeológicas.

La primera es una unidad intergranular y la segunda es una unidad de roca dura fisurada; en la Tabla 6.1 se presentan las equivalencias entre unidades hidrogeológicas y unidades geológicas.

Tabla 6.1 Unidades hidrogeológicas y su equivalencia en unidades geológicas

Unidad Hidrogeológica	Unidad Geológica
Intergranular	Aluvión calcáreo, aluvión volcánico, lahares de composición poligmitica, material volcanoclástico, brecha volcánica de composición basáltica, conglomerado Balsas.
Roca dura fisurada	Dacitas, andesitas y basaltos, Ignimbritas y riolitas, calizas, rocas intrusivas y metamórficas del terciario

En la tabla 6.2 se presentan los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en campo y la unidad geológica donde se encuentra emplazado cada pozo. Las conductividades hidráulicas de los materiales de la zona van desde 10^{-4} hasta 10^{-6} , lo que nos habla de una buena conductividad hidráulica perteneciente a rocas granulares y fracturadas que conforman el sistema acuífero.

Tabla 6.2 Resultados de las pruebas de bombeo realizadas en la zona.

Unidad Geológica	Pozo	Coordenada X	Coordenada Y	K (m/s)	T (m ² /s)	S
Basalto	Emiliano Zapata	500643.19	2066912.63	1.2525×10^{-5}	1.25×10^{-3}	1.26812738
Aluvión volcánico	Tenextepango1	504610.27	2071064.19	1.9918×10^{-6}	1.99×10^{-4}	7.53×10^{-3}
Caliza	Apatlaco	503760.44	2077180.82	7.0554×10^{-5}	7.06×10^{-3}	3.43×10^{-1}
Caliza	Ciudad Ayala1	502763.09	2075233.29	3.5853×10^{-5}	5.27×10^{-3}	no se obtuvo
Conglomerado Volcánico	Paseos de Ayala1	509247.18	2074080.97	7.5077×10^{-5}	7.51×10^{-3}	13.2773538
Conglomerado Volcánico	Paseos de Ayala2	508800.89	2074278.07	1.393×10^{-6}	1.39×10^{-4}	no se obtuvo
Conglomerado Poligmitico	San Vicente de Juarez m1	501583.46	2065939.02	1.33×10^{-4}	1.33×10^{-2}	no se obtuvo
Conglomerado Poligmitico	San Vicente de Juarez m2	501583.46	2065939.02	4.88×10^{-4}	4.88×10^{-2}	no se obtuvo
Conglomerado Poligmitico	San Juan Ahuehueyo	506450.49	2069111.86	8.843×10^{-6}	8.84×10^{-4}	no se obtuvo
Aluvión volcánico	La Joya	505156.47	2071870.19	5.2286×10^{-5}	7.32×10^{-3}	no se obtuvo
Conglomerado Poligmitico	El Salitre	504808.6	2064993.56	2.8794×10^{-6}	2.88×10^{-4}	no se obtuvo

6.2.1.1 Unidad hidrogeológica intergranular

Constituida por materiales no consolidados del área de estudio que están estratificados entre sí y en ocasiones presentan diestratificación, cuya granulometría varía desde limo-arcilla a bloques de hasta 1.5 m de diámetro. En la tabla 6.3, se presentan las conductividades hidráulicas de cada material, de acuerdo con su tamaño de grano, tipo de matriz y compactación.

Por el tipo de granulometría que las constituye y el grado de compactación que presentan, hace que el porcentaje de su porosidad varíe sobre todo en los materiales del grupo Balsas, y en los lahares, y por consiguiente el valor de la conductividad hidráulica también varía, llegando a suponer la posible existencia de algunos horizontes semipermeables dentro del relleno clástico de la planicie

Las propiedades hidrodinámicas de algunos materiales (Tabla 6.3 y 6.4), fueron calculados a partir de pruebas de bombeo (Tabla 6.2), procesadas a través de los programas Acuífer Test y en hoja de cálculo. Otros valores, se asignaron con base en la literatura (Freeze and Cherry, 1979; Domenico, 1998; Walton, 1970).

Tabla 6.3 Conductividades hidráulicas de los materiales de la unidad hidrogeológica intergranular.

Unidad	K (m/s)
Aluvión calcáreo	3.5×10^{-5}
Aluvión volcánico	5.2×10^{-5}
Lahares de composición poligmitica	5.8×10^{-6} a 3.11×10^{-4}
Material volcanoclástico	7.5×10^{-5}
Brecha volcánica	1×10^{-3}
Conglomerado Balsas	1×10^{-8}

6.2.1.2 Unidad hidrogeológica fisurada

Integrada por rocas calizas, ígneas, volcánicas y metamórficas, caracterizadas porque predomina en ellas la conductividad hidráulica localizada es decir, en fracturas, ya que el porcentaje de su porosidad primaria es muy pequeño. Las fracturas están abiertas y pueden tener hasta 30 cm de amplitud y longitudes muy variables. Las rocas volcánicas, ígneas y

calizas presentan alta densidad de fracturas, que determina una importante conductividad hidráulica; las calizas poseen también flujo a través de conductos de disolución desarrollados sobre las fracturas.

La tabla 6.4, contiene las diferentes rocas de esta unidad hidrogeológica y el valor de la conductividad hidráulica, asignada, con base en el grado de fracturamiento que presenta y con apoyo en datos existentes en la literatura y pruebas de bombeo (Tabla 6.2) realizadas en campo, respectivamente.

Tabla 6.4 Conductividades hidráulicas de la roca consolidada encontrada en el área de estudio.

Unidad	K (m/s)
Dacita	1×10^{-6}
Andesita	1×10^{-6}
Basalto	1.2×10^{-5}
Ignimbrita	1×10^{-7}
Riolita	1×10^{-8}
Caliza	5.3×10^{-5}
Intrusivo	1.4×10^{-5}
Metamórfico	1.1×10^{-9}

6.3 TIPO DE ACUÍFERO

De acuerdo con el modelo geológico conceptual de las unidades hidrogeológicas anteriormente descritas y por el tipo de porosidad predominante (primaria y secundaria), en el área de estudio existen dos tipos de acuífero.

Acuífero intergranular: Su permeabilidad y su conductividad hidráulica están controladas por la porosidad intergranular, resultante de los materiales litológicos que corresponden a clastos desde arcilla a bloques, permitiendo que el agua se almacene y circule a través de los espacios intergranulares.

Acuífero fisurado: La conductividad hidráulica y la permeabilidad de éstos dependen en mayor parte de la existencia de fracturas, tanto de origen mecánico como de disolución. Dentro de área de estudio, en el primer caso están las rocas volcánicas, basalto, andesita,

dacitas, ignimbritas, y las rocas ígneas y las metamórficas, mientras que en el segundo tipo se incluyen a las rocas caliza y dolomía.

Hidrogeológicamente estos acuíferos están interestratificados como se observa en la figura 6.1; de arriba hacia abajo ésta primero el acuífero intergranular, que pasa transicionalmente al acuífero fisurado y después, nuevamente se tiene el intergranular; finalmente lo que en este estudio se considera como basamento, corresponde a un paquete de roca metamórfica.

Con excepción de las áreas de Chinameca, Tepalcingo y Tlayecac, en la periferia de la planicie, predomina el acuífero fisurado; en esas áreas el acuífero intergranular continúa fuera de la zona de estudio.

De acuerdo con el modelo geológico y características hidrogeológicas de las unidades de roca antes descritas, se puede decir, que éstas tienen comunicación hidráulica entre sí, por lo que constituyen un sistema acuífero de tipo libre heterogéneo y anisótropo.

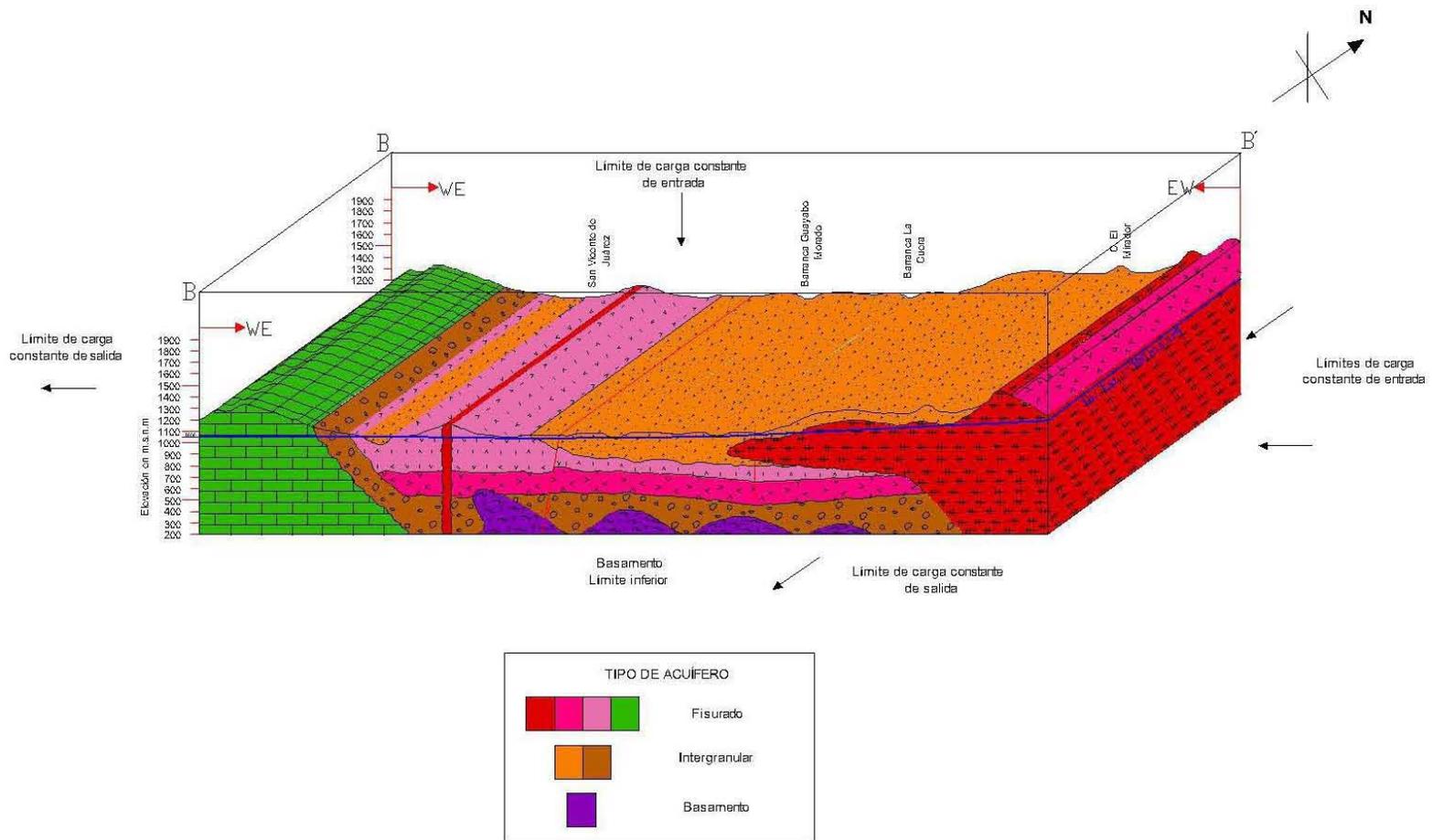


Fig. 6.1 Bloque isométrico del modelo hidrogeológico conceptual del área de Tenextepango

6.4 NIVEL ESTÁTICO

Con el fin de conocer la dirección del flujo subterráneo, se cartografió la elevación del nivel estático en la zona de Tenextepango, a partir de la profundidad de dicho nivel registrados durante el mes de septiembre del 2008 (Tabla 6.5).

La distribución y configuración de las líneas equipotenciales que se muestran en la figura 6.2 presentan un comportamiento espacial muy uniforme, los valores descienden de noreste a suroeste, se observan ligeros conos de abatimiento en los pozos Tenextepango, La Joya, Paseos de Ayala 1 y Paseos de Ayala 2; que son pozos donde se extrae agua por un periodo de bombeo más largo, en promedio de 22 horas al día.

La mayor elevación del nivel estático se presenta en los pozos Paseos de Ayala 2, Paseos de Ayala 1 y Tlayecac con 1307.5, 1281 y 1265 msnm respectivamente, situados al NE, a un kilómetro fuera de la zona de estudio; mientras que en la zona de estudio la menor elevación del nivel está en los pozos San Vicente y Chinameca 4 con 1042 msnm.

Tabla 6.5 Nivel estático de los pozos de la región de Tenextepango, Cuautla.

POZO	X	Y	Z	Elevación N.E (msnm)
Apatlaco	503760.44	2077180.82	1205	1202.79
Chinameca 4	500791.08	2060517.42	1043	1042.15
Ciudad Ayala	502763.09	2075233.29	1216	1203.62
Emiliano Zapata	500643.19	2066912.63	1058	1056.51
La Joya Tenextepango	505156.47	2071870.19	1141	1110.64
Leopoldo Heredia	503900.56	2070584.57	1118	1114.41
Manantial Atotonilco	517788.89	2062185.42	1203	1201
Manantial Relleros	502052.62	2061014.17	1111	1110
Manantial Tecomalco	501235.71	2062363.38	1050	1049
Paseos Ayala 1	509247.18	2074080.97	1294	1281.26
Paseos Ayala 2	508800.89	2074278.07	1318	1307.5
El Salitre	504808.6	2064993.56	1099	1096.6
San Juan Ahuehuevo	506450.49	2069111.86	1119	1116.47
San Vicente de Juárez	501583.46	2065939.02	1057	1042.7
Tenextepango 1	504610.27	2071064.19	1181	1177.41
Tlayecac	513886.47	2074244.26	1394	1265.02

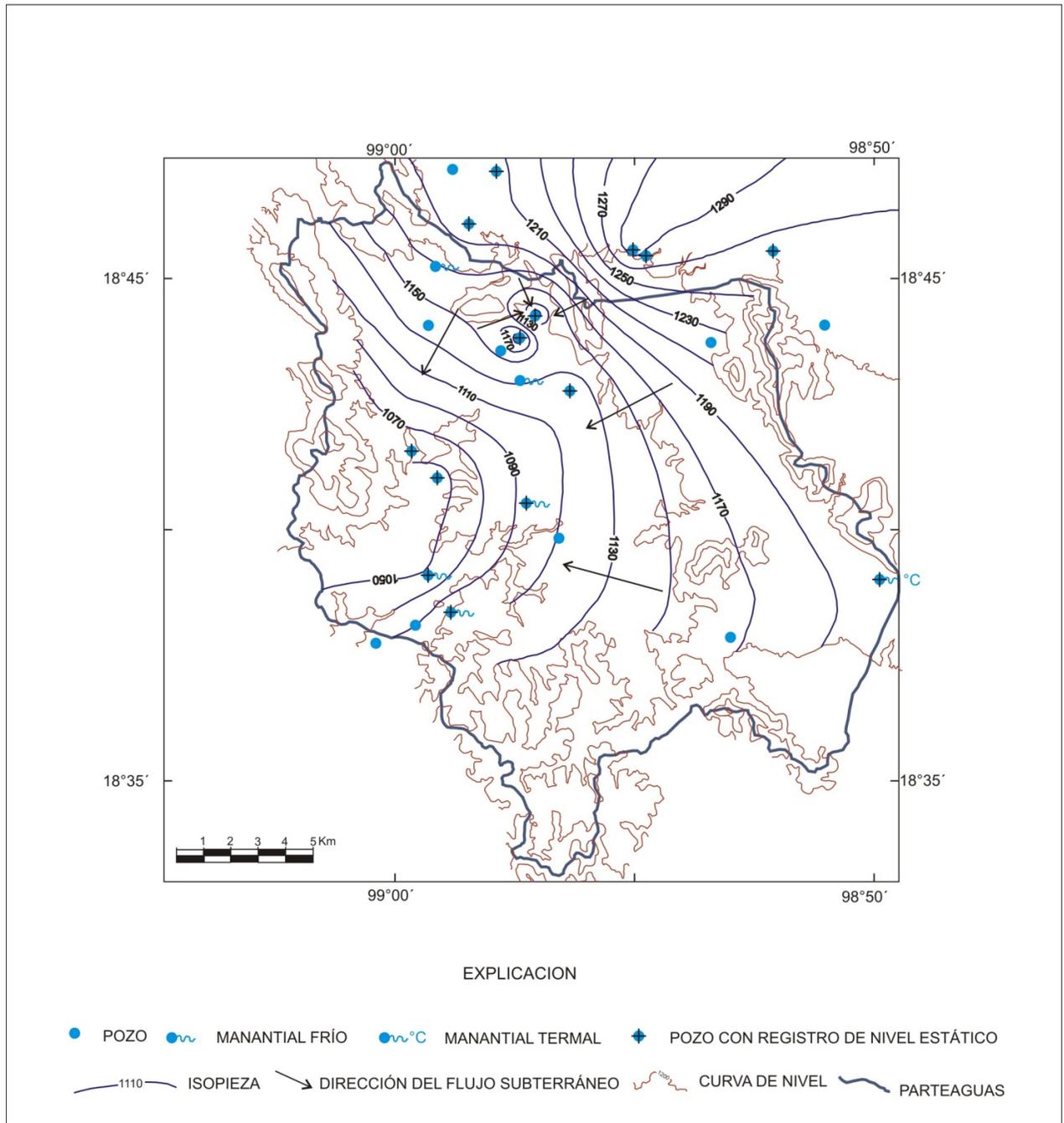


Fig. 6.2. Dirección del flujo subterráneo de la zona de Tenextepango, Cuautla.

6.4.1 Gradiente Hidráulico

La configuración del gradiente hidráulico en la región de Tenextepango, se logró a partir de medir el nivel estático en diez pozos (Apatlaco, Ciudad Ayala, Paseos de Ayala 1 y 2, Tlayecac, La Joya Tenextepango, Tenextepango1, San Juan Ahuheyó, Emiliano Zapata y San Vicente de Juárez) y la elevación de la surgencia en tres manantiales (El Salitre, Tecomalco, Relleros) que hay en la zona de estudio; también se consideró el valor registrado en cinco pozos situados a una distancia máxima de un kilómetro afuera del límite hidrográfico del área estudiada. De esta manera, la red de sitios de medición considerada la constituyen 13 pozos y 3 manantiales.

De acuerdo con los datos de los pozos donde se obtuvo mayor elevación (Pases de Ayala 2); y menor elevación (San Vicente) de nivel estático, se origina un gradiente hidráulico de 0.024 entre ambos pozos.

6.4.2 Dirección del flujo subterráneo

Para el año 2008, la configuración de las líneas equipotenciales en la región de Tenextepango, muestran que el flujo subterráneo fluye principalmente de noreste a suroeste, (Figura 6.2), también permite decir, que la región que aquí interesa recibe aporte desde el exterior, el cual procede desde las laderas del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin; situados en los sectores noreste y norte del área, respectivamente. Una vez en la zona de estudio llegan a formar manantiales de temperatura fría en su mayoría y uno termal.

6.5 CONDICIONES DE FRONTERA DEL FLUJO

En la figura 6.1, se representan los dos tipos de acuífero establecidos en el área de estudio, y también se indican los diferentes tipos de límites o frontera considerados.

6.5.1 Fronteras de carga constante de entrada

Corresponde a los límites laterales norte y oriente del bloque isométrico en donde como ya se explicó, se presenta el principal flujo subterráneo que abastece al acuífero de Tenextepango, tiene dirección de procedencia de noreste a suroeste, de igual forma existe el aporte de agua meteórica por el límite superior del modelo.

6.5.2. Fronteras de carga constante de salida

Para este caso se establece que existe salida de aguas subterránea por las fronteras oeste y sur del bloque del modelo (Figura 6.1).

De esta manera el modelo hidrogeológico presenta una zona de recarga intermedia procedente desde las laderas del Popocatepetl, recarga local en los relieves que rodean la zona, así como en la misma planicie. Mientras que en la misma planicie se presentan descargas locales a través de manantiales.

6.5.3. Límite impermeable o Basamento

Esta frontera está constituida por roca metamórfica, de la cual se establece que su principal característica es ser una frontera impermeable, por lo tanto, a través de esta no existe recarga ni ningún tipo de infiltración. Es la base del sistema acuífero, de acuerdo al modelo representado en la Figura 6.1.

6.6 ISOTOPOS ESTABLES

En este apartado, se emplearon técnicas isotópicas de autores como Craigh, (1961a) y Rozanski, *et al.* (1993), para intentar identificar fuentes principales de recarga y edad aproximada del agua que extraen los pozos, así como las posibles trayectorias del flujo subterráneo; a partir de la interpretación del contenido de deuterio, oxígeno¹⁸, y tritio.

En este estudio, el análisis se apoya en el contenido de isótopos estables del agua en 8 pozos, un manantial y tres muestras de agua de lluvia.

Los resultados isotópicos se muestran en la tabla 6.5, y su representación gráfica con respecto a la línea meteórica mundial (Figura 6.3), se muestra en la gráfica 6.1 (Rozanski, *et al.*, 1993). La gráfica 6.1, muestra que por el contenido isotópico los sitios analizados forman dos grupos; el primero formado por los pozos Tenextepango, Longaniza, Emiliano Zapata y manantial Buenavista, ubicados arriba de la línea meteórica, y esto indica, que el agua que captan esos pozos se recarga a altitudes similares, proveniente de una zona con temperatura templada a fría.

En el segundo grupo lo forman los pozos Jaloxtoc, Tlayecac, Salitre y Palo Blanco, ubicados debajo de la L.M.M, y que presentan un agua más enriquecida en $\delta^{18}\text{O}$, por consiguiente se asocian a una zona de recarga situada a menor elevación con respecto a la del grupo anterior, con temperatura más cálida; así mismo su agua ha tenido más evaporación parcial que la del grupo uno.

En cuanto al contenido de tritio medido en el agua de seis pozos (Tabla 6.5), el agua de los pozos Tenextepango y Chinameca 5, manifiestan mayor tiempo de residencia; mientras que el pozo de la Longaniza presenta el agua de más reciente infiltración de todos.

Finalmente, el contenido isotópico de agua de lluvia se captó en tres sitios ubicados a diferente elevación; San Andres, a 2490 msnm, Ocuituco a 1939 mnsn y Tenextepango a 1158 msnm. Los valores de isótopos de los tres sitios son totalmente diferentes, resaltando aquel de Tenextepango, pues como se observa esa muestra fue colecta a una menor elevación topográfica, no obstante, presenta los valores isotopicos más negativos, lo cual indica que se trata de un agua que ha presentado un intercambio con CO_2 y/o hidrólisis de silicatos, cuyo efecto es un aumento en el contenido de bicarbonato, mientras que los valores de los dos sitios restantes, son cercanos entre sí. La diferencia significativa entre San Andrés y Ocuitutio, concuerda con la diferencia de elevación entre los sitios.

Tabla 6.6 Contenido isotópico de oxígeno, deuterio y tritio, en el agua subterránea y de lluvia en la región de Tenextepango, Morelos.

Muestra de agua	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	Tritio (TU*)
Buenavista (M)	-9.6	-69	N/R
Chinameca 5-2 (P)	-8.7	-64	0.8±0.7
Emiliano Zapata (P)	-9.2	-66	N/R
Jaloxtoc (P)	-9.5	-71	1.1±0.7
Longaniza (P)	-9.8	-70	2.4±0.6
Ocuituco (LI)***	-9.5	-66	2.2±0.7
Palo Blanco (P)	-7.8	-61	N/R
Salitre (P)	-8.1	-65	1.5±0.6
San Andres (LI)	-10.3	-70	1.4±0.6
Tenextepango (LI)	-12.2	-90	1.7±0.7
Tenextepango (P)**	-9.8	-70	<0.8±0.6
Tlayecac (P)	-8.6	-66	N/R

*El Tritio se reporta en Unidades de Tritio (Tritium Units)

1TU = 3.221 Picocuries/L por IAEA, 2000 Report

1TU = 0.11919 Becquerels/L por IAEA, 2000 Report.

N/R; no se reporta

M; manantial

**P; agua de pozo ●

***LI; agua de lluvia ●

N/R; no se realizó análisis

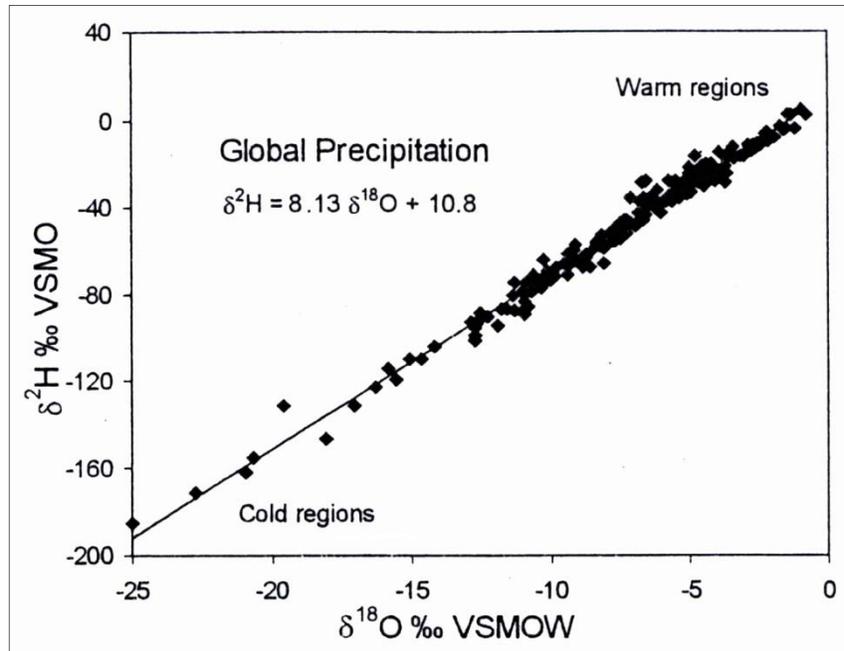
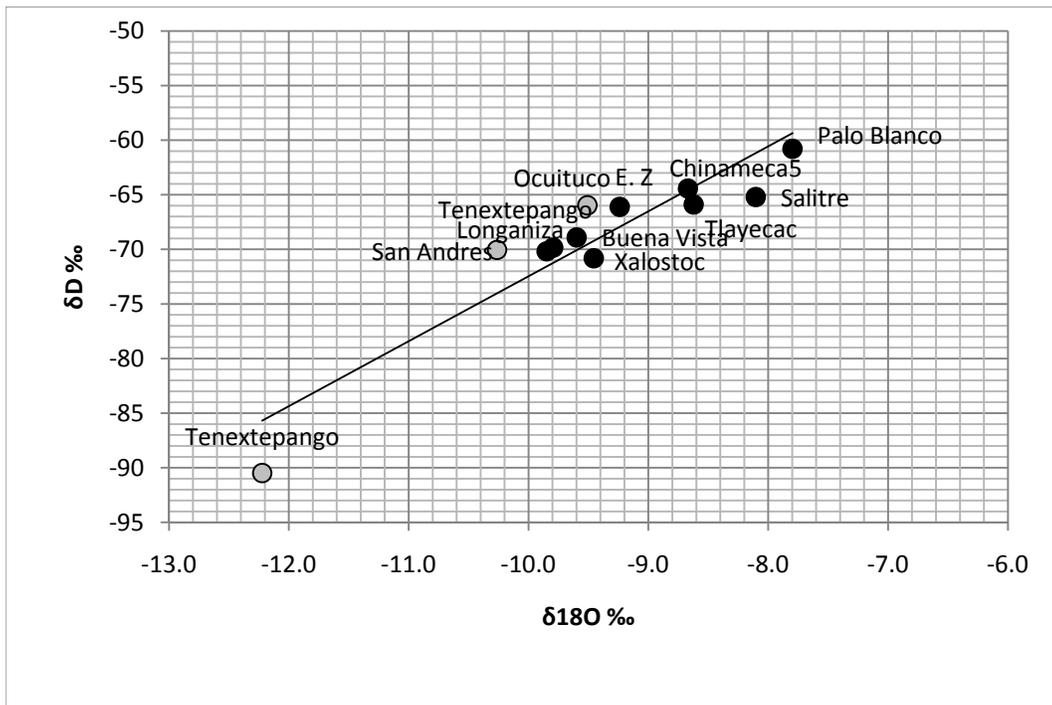


Fig. 6.3 Relación meteórica para ^{18}O y $\delta^2\text{H}$ en precipitación. Datos promediados para precipitación anual monitoreada en la red global de la estación IAEA (Rozanski, *et al.*, 1993)

Grafica 6. 1 Comparación de valores de $\delta^{18}\text{O}$ ‰ y δD ‰ de la zona de Tenextepango, Cuautla.



VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea al desplazarse a través de las rocas se mineraliza con relativa facilidad. Considerando que existen iones disueltos en el agua, pueden representar un riesgo para la salud del ser humano u otros seres vivos, dependiendo de su concentración. Por tal motivo, es importante conocer las características físicas, la composición química y el contenido bacteriológico del agua subterránea, y de esta forma, determinar la calidad así como el uso para el cual es más recomendable destinarla: agrícola, doméstico o industrial.

El contenido iónico y la composición química del agua subterránea del área de estudio se determinó a través de análisis químicos provenientes de 20 aprovechamientos de agua: cuatro manantiales, 15 pozos y una planta purificadora. La Tabla 7.1 contiene los resultados de los análisis químicos, ahí se observa que los iones predominantes son los bicarbonatos, sodio-potasio, sulfatos y calcio.

7.1.1 Resultados de Aniones y Cationes

Al graficar e interpretar esos resultados en los diagramas de Stiff, (Figura 7.1), se identifican dos facies hidroquímicas: i) cálcica bicarbonatada que es la predominante y ii) sódica bicarbonatada. También existe un caso de facies sódica sulfatada. La existencia de esas facies hidroquímicas manifiesta que el agua captada por los pozos fluye por rocas cuyos minerales contienen calcio y sodio en abundancia, en este caso, se trata de rocas volcánicas de composición intermedia a ácida y rocas calcáreas.

Los mismos datos también fueron interpretados mediante un diagrama de Piper (Figura 7.2), en el que se observó, que se trata de un agua de mezcla, donde predominan las facies sódica-bicarbonatada y cálcica-bicarbonatada, por lo que se infiere que es agua de reciente infiltración.

Tabla 7.1 Composición química del agua subterránea de la zona de Tenextepango.

Muestra	Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻		Error (%)
	(mg/L)	(meq/mol)	(mg/L)	(meq/mol)	(mg/L)	(meq/mol)	(mg/L)	(meq/mol)	(mg/L)	(meq/mol)	(mg/L)	(meq/mol)	(mg/L)	(meq/mol)	
San Juan Ahuehuevo (P)	56.43	2.45	22.01	0.56	86.65	4.32	32.12	2.64	80.45	2.27	110.3	2.3	328.01	5.376	0.12
Anenecuilco (P)	119.7	5.207	15.1	0.386	44.6	2.223	23.1	1.9	94.52	2.666	80.1	1.667	205	3.36	11.62
Axocache (M)	77.06	3.35	32.15	0.824	78.98	3.949	10.39	0.854	60	1.692	186.6	3.885	201.78	3.307	0.52
Buenavista (M)	71.4	3.104	14.9	0.381	114.2	5.712	19.21	1.58	78.18	2.205	87.63	1.824	354.21	5.806	4.57
Chinameca 5 (P)	93.58	4.07	28.31	0.724	80.9	4.037	20.2	1.662	65.2	1.84	85.23	1.775	398.16	6.526	1.71
Chinameca 4 (P)	75.87	3.3001	21.96	0.563	85.2	4.241	22.1	1.82	49.16	1.387	84.2	1.75	406.23	6.658	0.65
E. Zapata (P)	79.94	3.476	15.14	0.387	135.7	6.77	21.3	1.752	61.23	1.727	186	3.873	250.33	4.102	12.15
Jaloxtoc (P)	149.22	6.491	32.21	0.824	180.3	8.997	15.23	1.253	61.02	1.721	126.3	2.63	598.32	9.807	10.74
La Joya (P)	87.96	3.824	36.12	0.926	104.5	5.215	57.81	4.756	73.59	2.076	186.6	3.885	489.21	8.019	2.58
La Longaniza (P)	85.04	3.7	23.12	0.591	106.9	5.33	25.2	2.07	102.6	2.894	99.59	2.07	401.25	6.577	0.65
Lauro Ortega (P)	35.99	1.565	10.5	0.269	85.6	4.271	20.21	1.662	45.32	1.278	19.53	0.407	280.31	4.595	10.59
Leopoldo Heredia (P)	120.12	5.223	120.1	5.225	15.1	0.39	30.63	2.52	105.1	2.964	105	2.19	440	7.212	3.86
Palo Blanco (P)	86.8	3.774	10	0.256	14.8	0.74	16.8	1.382	70.08	1.977	18	0.375	200.5	3.286	4.36
Planta Purificadora	84.2	3.662	12	0.307	165	8.234	12	0.987	98.32	2.773	65	1.353	490	8.032	4.07
Relleros (M)	60	2.61	5	0.128	28	1.397	9	0.74	49.1	1.385	32.9	0.685	146.42	2.4	4.33
El Salitre (P)	149.72	6.51	14.52	0.371	134.6	6.716	35.1	2.887	110.5	3.117	135.7	2.826	400	6.557	13.75
San Vicente de Juarez (P)	93.7	4.076	15.9	0.407	34.4	1.717	16.5	1.357	70.08	1.977	105	2.186	190.3	3.118	1.86
Tecomalco (M)	92.58	4.025	34.21	0.877	225	11.228	35.21	2.896	149.1	4.206	122.1	2.541	512.32	8.397	11.36
Tenextepango (P)	84.41	3.672	12	0.307	165.1	8.239	13	1.069	90.1	2.541	70.55	1.469	490.25	8.036	4.90
Tlayecac 2 (P)	98	4.261	2.6	0.067	20.8	1.04	13.2	1.086	49.056	1.384	28.85	0.601	195.23	3.2	10.90

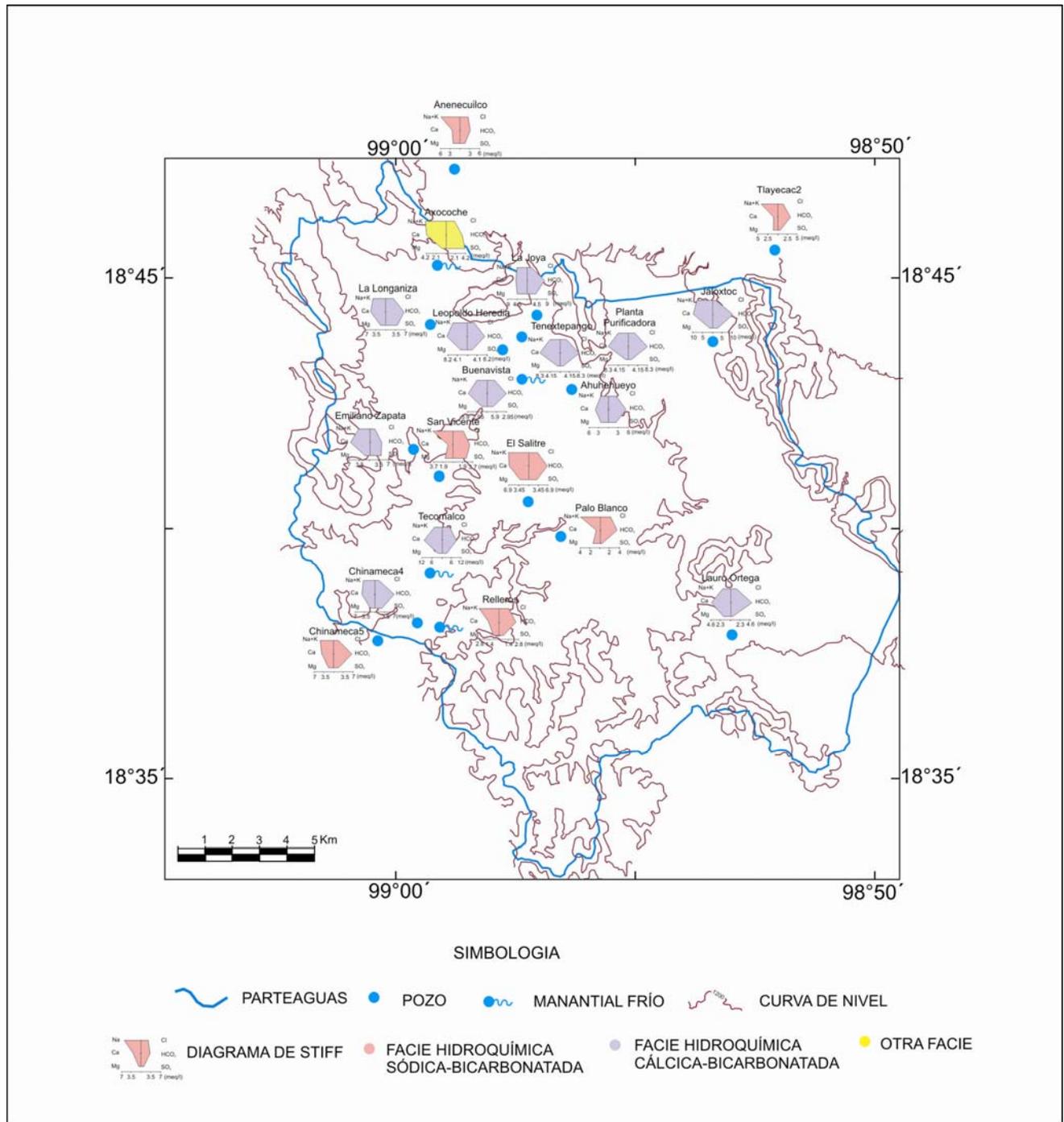


Fig. 7.1 Distribución espacial de las facies hidroquímicas en la zona de Tenextepango, Cuautla.

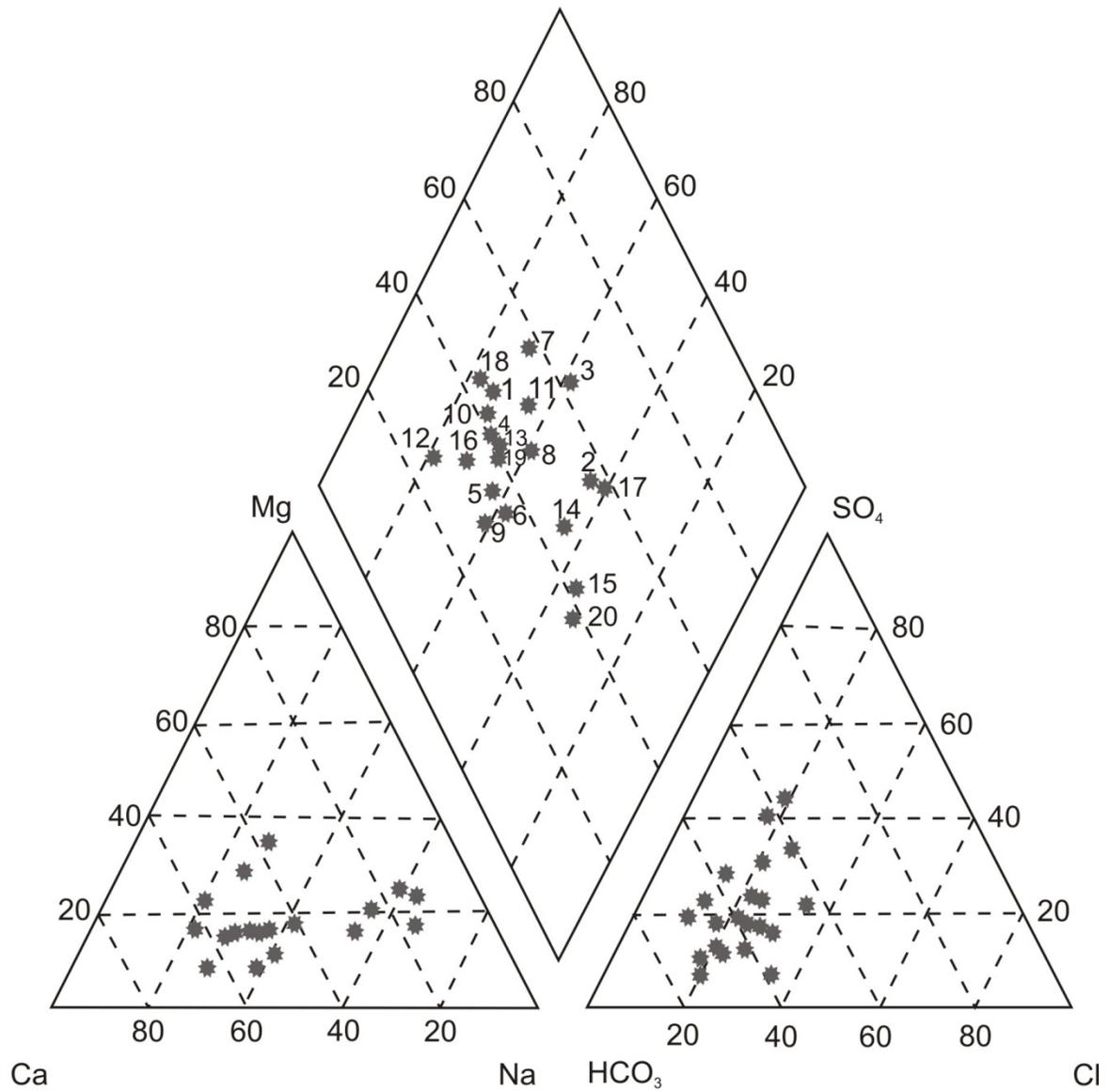


Fig. 7.2 Diagrama de Piper para la zona de estudio

7.1.2 Resultados de análisis de fluoruros

Con base en las concentraciones de fluoruro en agua detectado en el muestreo llevado a cabo en 7 manantiales, 20 pozos y una planta purificadora, en septiembre de 2008, se tiene que el contenido de fluoruro varía de 0.20 mg/L a 1.9mg/L (Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Resultados de análisis de fluoruro en pozos de la región de Tenextepango, Cuautla.

Nombre	F- mg/L
Aguahedionda (M)	1.3
Almeal (M)	0.35
Anenecuilco (P)	1.01
Apatlaco (P)	0.24
Axocoche (M)	0.63
Ayala Morelos (U.H.) Mariano Matamoros (P)	1.7
Buenavista (M)	0.84
Chinameca4 (P)	0.47
Chinamenca5 (m1) (P)	0.44
Ciudad Ayala (P)	1.6
Emiliano Zapata (P)	0.2
Jaloxtoc (P)	0.75
Jaramaya (P)	0.6
La Joya Tenextepango (P)	1.09
Leopoldo Heredia (P)	1.05
La Longaniza-palmas (P)	0.71
Palo Blanco (P)	0.28
Paseos Ayala1 (P)	1.7
Paseos Ayala2 (P)	1.7
Planta purificadora	1.89
Relleros (M)	0.47
Sabinos (M)	0.46
El Salitre (m1) (P)	0.98
San Juan Ahuehuevo (P)	1.3
San Vicente de Juárez (P)	0.45
Tecomalco (M)	0.7
Tenextepango (m1) (P)	1.9
Tlayecac (P)	0.46

M; manantial
P; pozo
m1; muestra 1

La figura 7.3, muestra la distribución espacial del contenido del fluoruro y se observa que la mayor concentración de fluoruros en el agua subterránea se localiza en tres zonas situadas justo en el límite exterior norte y noreste del área de estudio, Ciudad Ayala, Paseos de

Ayala y Unidad Habitacional Mariano Matamoros con temperatura de 26.18 °C, ubicados en dirección de la ladera sur del volcán Popocatepetl (activo desde 1993), y que forma el parteaguas regional del área de estudio, con valores de hasta (1.7 mg/L); y en tres sitios al interior del área situados en el norte y centro oeste; Tenextepango, la Joya y el Salitre, con temperatura de 23.63, 25.13 y 24.40 °C, y fluoruro de 1.9, 1.07 y 0.98 mg/L, respectivamente.

Las isolíneas de fluoruro en la figura 7.3, indican que éste aumenta de noreste a suroeste. Esto sugiere, que el fluoruro procede en parte de las rocas que rodean la planicie de Tenextepango, existiendo a su vez fuentes internas.

Los pozos Tenextepango y la Joya, a pesar de estar rodeados por relieves calcáreos tienen un alto contenido de fluoruro, se pensaría que captan agua de las calizas y eso disminuiría el Fluoruro, sin embargo, están emplazados en el relleno aluvial; y por la dirección del flujo subterráneo que ahí existe, sugiere que el agua que captan dichos pozos procede del exterior de la zona, e incrementa el contenido de fluoruros.

En el sector centro-oeste, los pozos El Salitre y San Vicente de Juárez (Figura 7.3), se asocian a una misma fuente local (sistema de flujo local), ya que la geología de esa zona corresponde a rocas de composición de intermedia a ácida (Mapa 1 en Anexo B). Se infiere que el pozo El Salitre, también recibe influencia del flujo subterráneo proveniente de la zona noreste.

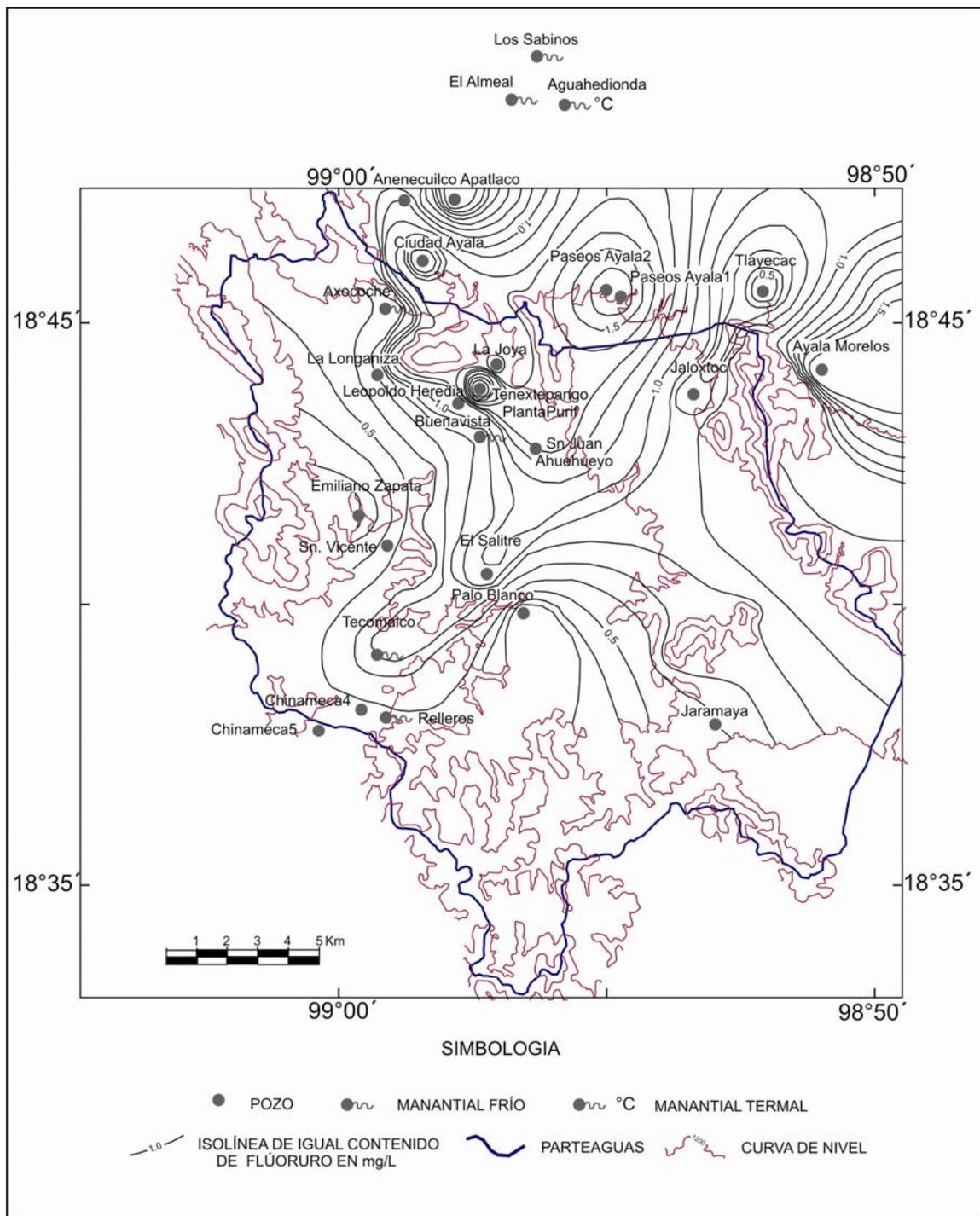


Fig. 7.3 Distribución espacial del Flúor en el agua subterránea de Tenextepango – Tepalcingo, Morelos.

En la tabla 7.3 se observan los coeficientes de correlación del contenido de fluoruros en el agua, con respecto al contenido de cationes y aniones obtenidos en el mismo muestreo. Se observa que el contenido de fluoruro en el agua subterránea se correlaciona

positivamente con el HCO_3^- , Ca^{2+} y Cl^- , es decir, a mayor cantidad de uno o todos estos iones, habrá como consecuencia, una cantidad existente de fluoruro acomplejándose con ellos y dependiendo de las características fisicoquímicas del agua, se definirá la cantidad en disolución de ambos iones. En resumen, cuando más se aproxime el coeficiente de correlación al número 1, más fuerte será la relación.

En la Figura 7.1 se observa que la familia de agua predominante en la zona de estudio es la cálcica-bicarbonatada. Ya que la asociación entre bicarbonato, calcio y fluoruro es buena, al acomplejarse y precipitar, existirá menos Flúor disuelto en el agua.

Tabla 7.3 Coeficiente de correlación entre las concentraciones de fluoruro y aniones y cationes en el agua subterránea de Tenextepano, Cuautla.

F-/Na ⁺	F-/K ⁺	F-/Ca ²⁺	F-/Mg ²⁺	F-/Cl ⁻	F-/SO ₄ ²⁻	F-/HCO ₃ ⁻
0.085	0.111	0.395	0.129	0.441	0.016	0.524

En la Tabla 7.4 se presentan los datos medidos en campo. Se puede observar que se trata de un agua tibia (17 a 25 °C), a moderadamente caliente (25 a 35°C); la cual se considera puede estar asociada a sistemas de flujos de tipo local e intermedio respectivamente.

Tabla 7.4 Parámetros físico-químicos del agua subterránea medidos en campo. En los sitios m1, m2, se registró una medición antes de parar el bombeo y otra después de iniciar nuevamente el bombeo.

Pozo	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/cm)	pH	Eh (mV)	F ⁻ (mg/L)
Agua Hedionda (M)	25.80	2.662	5.780	205.900	1.3
El Almeal (M)	17.63	10.025	6.085	184.033	0.35
Anenecuilco (P)	22.30	1.128	6.610	-24.700	1.01
Apatlaco (P)	23.24	0.022	7.159	124.988	0.24
Atotonilco (M; m1)	32.00	1.898	6.628	155.825	*N.M
Atotonilco (M; m2)	35.30	1.700	6.300	175.300	N.M
Axocoche (M)	22.43	1.062	6.577	157.767	0.63
Ayala 1 (P)	21.79	10.575	7.205	147.528	N.M
Ayala Morelos (P)	25.90	6.825	7.845	106.733	1.7
Buenavista (M)	23.50	1.080	7.227	138.933	0.84
Chinameca 4 (P)	25.48	1.522	7.282	137.200	0.47
Chinameca5 (P; m1)	25.68	2.045	7.555	120.067	0.44
Chinameca5 (P; m2)	25.48	1.522	7.282	137.200	N.M
Emiliano Zapata (P)	25.28	1.191	7.136	144.788	0.2

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Jaloxtoc (P; m1)	26.40	1.643	6.968	154.850	0.75
Jaloxtoc (P; m2)	26.10	2.489	7.010	152.657	N.M
Jaramaya (M)	25.90	0.708	7.588	119.125	0.6
Joya Tenextepango (P)	25.13	1.027	7.029	151.000	1.09
Leopoldo Heredia (P)	23.53	0.950	7.353	132.867	1.05
La Longaniza Palmas (P)	23.63	0.994	7.285	137.025	0.71
Palo Blanco (P)	24.98	1.832	7.334	133.980	0.28
Paseos de Ayala 1 (P)	26.18	4.371	7.430	127.775	1.7
Paseos de Ayala 2 (P)	26.18	4.371	7.430	127.775	1.7
Los Sabinos (M)	19.73	0.467	6.543	155.750	0.46
El Salitre (P; m1)	25.90	1.354	7.225	143.150	0.98
El Salitre (P; m2)	26.06	1.360	7.309	135.200	N.M
San Juan Ahuehueyo	23.12	1.515	6.964	136.133	1.3
San Vicente de Juárez (P; m1)	24.40	1.114	7.302	135.720	0.45
San Vicente de Juárez (P; m2)	24.19	1.035	7.301	135.800	N.M
Tecomalco (M)	24.56	0.965	7.272	137.140	0.7
Tenextepango (P)	23.63	1.141	7.248	138.500	1.9
Tlayecac (P; m1)	30.60	0.789	8.168	85.342	0.46
Tlayecac (P; m2)	30.00	1.060	8.175	85.150	N.M

*NM: No se analizó muestra.

M: manantial.

P: pozo.

m1: muestra 1.

m2: muestra 2, tomada 12 horas después de m1.

La tabla 7.5, muestra el valor del coeficiente de correlación que existe entre la concentración del fluoruro en el agua subterránea y los parámetros físico-químicos temperatura, conductividad eléctrica, pH y Eh. Se observa que la mayor correlación del fluoruro es con la conductividad eléctrica y temperatura, esto sugiere que es el contenido de sales y la temperatura los que podrían estar propiciando la liberación del fluoruro en el agua subterránea.

En cuanto al pH, se trata de un pH que va de 6 a 8 unidades, sin embargo, de acuerdo con los valores de correlación (Tabla 7.5) la influencia del pH es poco significativa en la liberación de fluoruro en el agua subterránea de esta zona. El Eh presenta una correlación negativa y casi nula con el contenido de fluoruros en el agua subterránea.

Tabla 7.5. Correlación de concentración (C.C) de fluoruro vs parámetros físico-químicos del agua subterránea de la zona de estudio.

F-/T	F-/Ce	F-/pH	F-/Eh
0.169	0.257	0.064	-0.067

7.2 GEOQUÍMICA DE ROCAS

El trabajo de campo y el análisis petrográfico realizado (tabla 7.6) muestran que en el área de estudio existen rocas de cada uno de los tres grupos, (ígneo, metamórfico o sedimentario); cuya clasificación y distribución se muestra en la figura 3.1 y tabla 7.6. Como complemento de esa clasificación, se llevó a cabo el estudio geoquímico de 25 rocas (Tabla 7.7), para confirmar la clasificación y también para conocer el contenido de elementos mayores y traza ya que ello definirá en gran medida la calidad del agua subterránea.

Tabla 7.6 Resultados de la clasificación de láminas delgadas de la zona de estudio.

# Lámina Delgada	Clasificación
CUAU-6	Pedernal
CUAU- 15	Andesita de Hornblenda
CUAU- 16	Cuarzolatita (Intrusivo)
CUAU- 18	Traquita
CUAU-20	Basalto de Hiperstena
CUAU- 21	Toba cinerítica
CUAU - 22	Latita con Xenolitos
CUAU- 23	Cuarzo Latita
CUAU- 24	Basalto
CUAU- 28	Andesita de Hornblenda
CUAU- 31	Andesita
CUAU- 32	Andesita
CUAU- 33	Cuarzo Latita
CUAU- 34	Toba lítica andesítica
CUAU- 36	Basalto
CUAU- 37	Andesita
CUAU- 38	Basalto de Biotita
CUAU- 41	Latita
CUAU- 42	Basalto
CUAU- 45	Dacita de Biotita
CUAU- 47	Andesita
CUAU- 49	Andesita
CUAU- 49 ^a	Toba lítica andesítica
CUAU- 50	Andesita
CUAU- 51	Andesita
CUAU- 52 A	Dacita
CUAU- 55	Skarn
CUAU- 56	Caliza (Grainstone)
CUAU- 58	Cuarzo Sienita

7.2.1 Elementos mayores

La tabla 7.7, muestra la concentración de los principales elementos químicos que forman las rocas del área de estudio, que provienen de los minerales primarios, accesorios y secundarios. Los compuestos predominantes en estos análisis son: sílice, calcio, aluminio, magnesio, hierro, sodio, potasio; los cuales son los principales componentes de minerales formadores de roca. En menor proporción se hallaron el titanio, fósforo y manganeso, que podrían estar asociados a minerales accesorios y secundarios (hornblenda, biotita, apatito, clorita).

Los valores de la tabla 7.7, indican que las rocas básicas aportarán mayor cantidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Al^{3+} al agua subterránea, mientras que las rocas ácidas aportarán SiO_2 , Na^+ y K^+ .

7.2.2 Elementos traza

Los elementos traza que presentan mayor incidencia en las rocas analizadas (Tabla 7.8), son: Bario, Estroncio, Zirconio, Cromo, Rubidio, Zinc, Vanadio, Cobalto, y en mucho menor abundancia, Níquel, Itrio, Cobre, Plomo, Torio, Niobio. Estos elementos, debido a las bajas cantidades en las que se encuentran, se asocian a minerales accesorios y secundarios.

Tabla 7.7 Análisis geoquímico de rocas de la zona de Tenextepango, Cuautla para elementos mayores. Los valores se muestran en % en peso.

Muestra	Roca	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	SUMA
2	Caliza arcillosa	19.033	0.028	0.308	0.166	0.012	0.452	44.882	0.113	0.157	0.018	35.21	100.38
3	Caliza	5.7	0.023	0.441	0.189	0.014	0.719	52.107	0.138	0.169	0.019	41.44	100.96
7	Caliza	54.432	0.009	0.283	0.45	0.01	0.292	24.668	0.126	0.066	0.018	20.07	100.42
9	Ignimbrita	74.031	0.459	13.825	0.766	0.007	0.594	0.449	1.533	5.702	0.093	2.96	100.42
9 ^a	Ignimbrita	70.989	0.444	13.634	2.411	0.022	0.816	0.525	1.218	6.276	0.102	3.18	99.62
9 ^b	Toba andesítica	48.814	0.538	12.124	3.878	0.059	2.511	15.761	2.953	1.44	0.163	11.83	100.07
12	Pedernal	89.76	0.02	0.331	0.707	0.008	0.494	3.37	0.058	0.038	0.023	3.54	98.35
13	Barita	33.303	0.053	0.084	0.308	0.089	1.248	17.525	0.147	0.026	0.007	13.9	66.69
16	Skarn	42.931	0.251	5.918	2.463	0.041	1.72	42.407	0.162	0.028	0.023	3.96	99.90
18	Andesita	52.993	1.072	16.669	6.962	0.102	4.222	8.345	2.804	2.18	0.231	5	100.58
19	Andesita	63.315	0.826	16.343	5.52	0.027	0.983	3.936	3.737	2.932	0.251	1.89	99.76
21	Ignimbrita	67.51	0.563	15.818	3.194	0.028	0.44	1.78	3.907	6.004	0.109	0.58	99.93
22	Latita	59.802	0.876	17.164	6.215	0.025	1.684	5.228	3.999	2.069	0.215	1.99	99.27
23	Cuarzo-latita	66.693	0.476	15.025	4.215	0.053	1.843	2.533	3.44	4.234	0.119	1.41	100.04
24	Basalto	59.583	0.94	16.586	6.369	0.107	3.506	6.318	3.216	1.809	0.202	2	100.64
30	Brecha Volcánica	54.114	1.067	15.496	7.417	0.163	3.847	4.362	1.488	1.171	0.265	9.58	98.97
31	Andesita	63.738	0.672	16.225	4.553	0.056	1.593	3.844	3.289	3.237	0.246	2.67	100.12
36	Andesita Basáltica	59.836	0.847	16.802	6.383	0.068	2.874	6.048	3.664	2.042	0.2	2.19	100.95
41	Andesita	67.032	0.476	15.693	4.171	0.127	0.417	2.577	3.8	4.392	0.101	0.73	99.52
43	Andesita	67.395	0.467	13.162	2.63	0.051	1.266	3.215	2.04	4.424	0.102	5.49	100.24
45	Dacita de Biotita	48.58	0.348	11.532	3.152	0.024	0.525	17.399	2.657	3.223	0.094	12.79	100.32
52b	Dacita	54.364	0.981	16.199	8.397	0.115	6.144	8.324	2.65	1.215	0.195	1.79	100.37
55	Skarn	43.445	0.586	11.566	2.669	0.485	3.356	34.561	0.157	0.089	0.035	2.42	99.37
56	Brecha calcárea	5.034	0.039	0.406	0.328	0.006	0.361	53.057	0.067	0.136	0.014	41.27	100.72
58	Cuarzo Sienita	60.405	0.887	14.885	4.582	0.051	2.613	6.684	5.589	2.762	0.232	1.04	99.73

Tabla 7.8 Análisis geoquímico de rocas de la zona de Tenextepango, Cuautla para elementos traza. Los valores están dados en ppm.

Muestra	Roca	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
2	Caliza arcillosa	6	154	36	<3	13	<1	4	29	5	<1	<1	<1	<3	<5
3	Caliza	7	253	11	<3	19	<1	6	14	6	<1	<1	<1	V	<5
7	Caliza	5	98	59	<3	9	<1	15	209	6	6	1	<1	0	<5
9	Igimbrita	181	151	724	49	319	12	28	60	6	9	8	29	19	11
9 ^a	Igimbrita	179	53	596	42	291	14	37	46	6	8	5	42	16	12
9b	Toba andesítica	35	429	298	11	132	5	70	91	15	37	20	54	3	6
12	Pederal	5	Int	int	<3	85	<1	int	Int	8	<1	35	15	9	73
13	Barita	3	int	int	int	265	<1	int	int	8	1	13	233	368	49
16	Skarn	5	142	321	3	55	1	14	48	5	2	<1	104	3	10
18	Andesita	46	372	501	25	187	8	145	122	25	22	10	120	7	10
19	Andesita	80	404	729	28	176	6	79	84	12	12	27	84	6	10
21	Toba cristalina	155	197	893	41	338	13	44	50	7	9	5	39	17	12
22	Latita	68	555	551	18	151	4	94	86	12	14	19	108	4	5
23	Cuarzo-latita	173	210	572	46	176	8	72	130	9	12	11	69	15	19
24	Basalto	70	339	528	22	188	6	136	69	10	9	9	75	8	11
30	Brecha Volcánica	29	1044	397	21	214	5	72	179	25	95	30	107	3	7
31	Andesita	57	379	533	27	193	7	133	100	11	6	4	80	5	10
36	Andesita Basáltica	169	218	643	44	194	10	79	148	9	12	5	56	17	19
41	Andesita	135	75	651	33	263	10	39	60	4	9	5	46	13	11
43	Andesita	100	155	359	28	111	5	68	77	5	7	2	50	8	6
45	Dacita de Biotita	7	287	<11	<3	25	<1	6	20	6	<1	<1	<1	<3	<5
52b	Dacita	73	400	578	25	242	9	148	141	11	22	8	38	15	12
55	Skarn	76	619	689	20	180	5	59	88	11	11	23	98	8	19
56	Brecha calcárea	26	374	385	18	141	5	199	234	23	22	5	88	5	6
58	Cuarzo Sienita	6	62	11	7	82	5	114	112	5	4	<1	33	<3	11

Nota:

Int= interferido por abundancia de bario. Los valores de Ba en la muestra 12, y Sr, Ba y Cr en la muestra 13 se midieron extrapolando en las curvas de calibración respectivas, por lo que esas concentraciones deben ser tomadas con reserva.

(<) indica valores por abajo del limite mínimo de detección del espectrómetro.

La muestra 13 presenta un alto contenido de bario, lo cual hace que el análisis resulte poco confiable, pero del mismo modo, es suficiente para comprobar que la muestra se trata de una barita.

7.2.3 Flúor en las rocas de la región de estudio

La tabla 7.9, contiene valores del contenido de flúor en por ciento de peso, las muestras con mayor contenido de flúor fueron la 27 (dacita), andesita (31, 47), brecha calcárea (56) y la muestra 3 (caliza arcillosa). Las muestras restantes tienen un contenido pequeño y similar de flúor. El flúor se determinó con microsonda electrónica de barrido, haciendo una exploración aleatoria, esto explica en parte, porque en la roca ignimbrita, se reporta un contenido muy pequeño de flúor ya que los minerales que lo contienen son comunes en las rocas ígneas ácidas- intermedia, como las que abundan en el área.

Tabla 7.9 Análisis geoquímico de rocas para arsénico y fluoruro.
Los análisis se muestran en porcentaje en peso (%)

Muestra	Roca	As ₂ O ₅	F
3	Caliza	0.00000	0.00567
9	Toba riolítica	0.04200	0.00500
12	Pedernal	0.03700	0.00400
13	Caliza	0.00700	0.00367
19	Andesita	0.00000	0.00333
21	Ignimbrita	0.01100	0.00300
23	Cuarzo-latita	0.00000	0.00260
27	Dacita	0.00000	0.25967
31	Andesita	0.03700	0.01200
34	Ignimbrita	0.00000	0.00300
41	Andesita	0.04120	0.00300
43	Andesita	0.00000	0.00400
44	Ignimbrita	0.22000	0.00300
46	Andesita	0.00000	0.00400
47	Andesita	0.00000	0.00675
56	Brecha Calcárea	0.00000	0.00600
62	Cuarzo-sienita	0.04800	0.00200

7.3 EXPERIMENTO DE INTERACCIÓN AGUA ROCA

Después de desmontar el experimento de interacción agua-roca, se mandó a analizar el agua obtenida como lixiviado. Cabe recordar que las rocas analizadas se molieron a fracción arcilla y grava, ambos tipos se colocaron en agua de lluvia y en agua destilada;

se agitaron diariamente por periodos de 20 minutos, a 120 revoluciones por minuto, durante 75 días (ver Capítulo III). La clasificación de las muestras utilizadas en el experimento se muestra en la tabla 7.10.

Tabla 7.10 Número de muestra utilizada en el experimento y su clasificación.

No.	Muestra
3	Caliza
9	Toba ácida
12	Pedernal
13	Barita
16	Skarn
19	Andesita
21	Ignimbrita
23	Cuarzo latita
31	Andesita
41	Andesita
43	Andesita
56	Brecha Calcárea

Las condiciones iniciales del agua utilizada al montar el experimento se presentan en la tabla 7.11.

Tabla 7.11 Condiciones iniciales del agua utilizada en el experimento

Tipo de Agua	Ph	Ce (mS)	T (°C)	Temp. Amb. (°C)
Destilada	4.54	0	19	19
Lluvia (Tenextepango)	4.81	0.012	18	23

Los parámetros físico-químicos finales del agua al desmontar el experimento se pueden observar en las tablas: 7.12, 7.13, 7.14 y 7.15.

Tabla 7.12 Parámetros físico-químicos del agua de lluvia utilizada en muestras fracción arcilla

Muestra	ph	T (°C)	Ce (µS/cm)	Vol. Rec. (ml)
3	8.16	18.7	0.334	148
9	7.96	15.6	0.207	66
12	7.88	15.6	-----	143
13	7.91	17.8	0.925	155
16	9	18	1.221	150
19	8.31	19.9	0.415	140
21	8.35	20.5	0.418	157
23	8.37	15.7	-----	69
31	8.09	20.3	0.516	148
41	8.23	20.1	0.386	126
43	8.1	19.7	0.464	115
56	8.04	19.4	0.226	147

Tabla 7.13 Parámetros físico-químicos finales del agua de lluvia utilizada en muestras fracción grava.

Muestra	ph	T (°C)	Ce (µS/cm)	Vol.Rec. (ml)
3	7.96	18	0.209	168
9	7.95	17.5	0.474	164
12	7.74	18.1	0.162	166
13	7.76	19.2	0.166	169
16	8.11	17	0.567	169
19	7.34	18	0.105	166
21	7.26	17.1	0.07	157
23	7.63	17.2	0.09	161
31	7.4	16.5	-----	169
41	6.98	19.8	0.048	161
43	8.09	18.5	0.415	161
56	7.99	17	0.192	173

Tabla 7.14 Parámetros físico-químicos del agua de destilada utilizada en muestras fracción arcilla

Muestra	ph	T (°C)	Ce (µS/cm)	Vol.Rec. (ml)
3	8.15	18.5	0.291	155
9	8.14	19.3	0.334	140
12	8.08	18.5	0.348	130
13	7.99	20	0.46	147
16	8.98	17.9	0.659	156
19	8.1	20.1	0.387	128
21	8.31	19.5	0.445	134
23	8.38	20.1	0.373	160
31	8.17	20.4	0.513	150
41	8.39	20.7	0.502	119
43	8.17	19.7	0.547	127
56	8.03	18.8	0.387	151

Tabla 7.15 Parámetros físico-químicos del agua de destilada utilizada en muestras fracción grava

Muestra	ph	T (°C)	Ce (µS/cm)	Vol. Rec. (ml)
3	8.02	18.8	0.42	162
9	7.97	17.8	0.375	165
12	7.92	17.6	0.177	171
13	7.51	17	0.078	171
16	8.23	18.3	0.301	174
19	7.37	17.5	0.038	169
21	7.2	17.6	0.042	162
23	7.66	17.8	0.12	158
31	6.83	15.8	0.238	168
41	7.25	18	0.03	162
43	8.1	17.5	0.463	165
56	7.96	19.6	0.192	170

Se observa una variación en los parámetros físico-químicos del agua utilizada al inicio de experimento y la recuperada al finalizar. De un pH ácido inicial, termina con un pH ligeramente ácido a alcalino (6-8.9 unidades). La temperatura generalmente se ve influenciada por la temperatura ambiente. Finalmente la conductividad eléctrica también presentó cambios, sobre todo en el agua destilada, pues durante el proceso de disolución se mezclaron sales y sólidos totales disueltos (STD), lo que provocó, un aumento.

7.3.1 Contenido de cationes en lixiviado de muestras tamaño arcillas

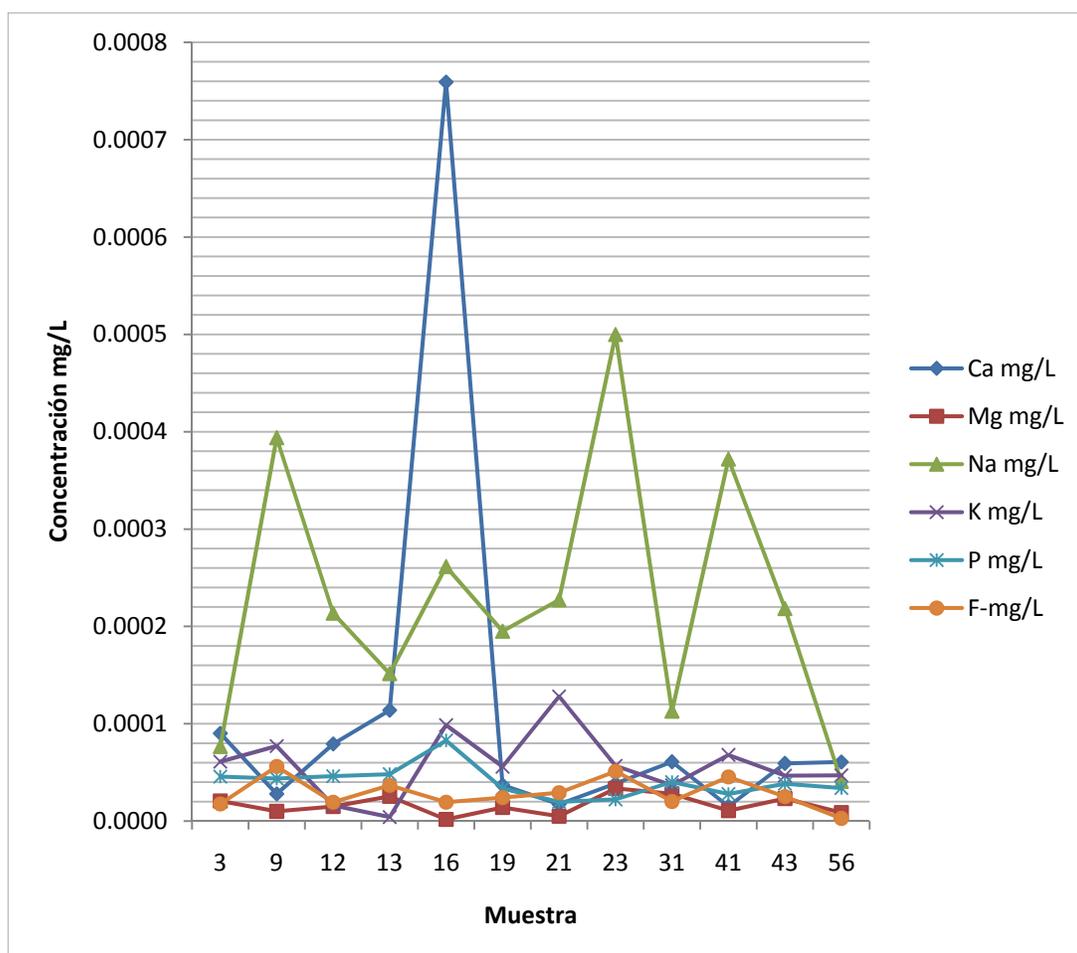
A continuación se presentan las gráficas y su discusión de los resultados de los análisis del agua de lixiviado del experimento de interacción agua-roca. Las tablas con los valores se ubican en el anexo E, dichos resultados fueron entregados por el laboratorio en unidades de µg/g; pero con el propósito de facilitar su lectura fueron convertidos a mg/L., por lo que las cantidades resultantes son muy bajas.

7.3.1.1 Agua de lluvia

La gráfica 7.2, muestra que el sodio fue el ión que tuvo la mayor tasa de disolución respecto a los demás iones (ver tabla de resultados E1 en Anexo E), con excepción de la muestra 16 (skarn) donde el calcio fue el más disuelto. Las concentraciones obtenidas se asocian directamente al contenido de dichos elementos en la roca, el sodio proviene de la plagioclasa sódica que es uno de los principales minerales formadores de roca.

El segundo catión mayormente disuelto fue el potasio, mientras que el calcio es el tercero, el cual se manifestó principalmente en las muestras 12 (pedernal), 13 (caliza-pedernal), 16 (skarn), 31 (cuarzo-latita), 43 (andesita) y 56 (caliza). En la muestra 16 (skarn) sobresale la disolución del fósforo (ver tabla E1 en Anexo E).

Gráfica 7.2 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en *agua de lluvia*.



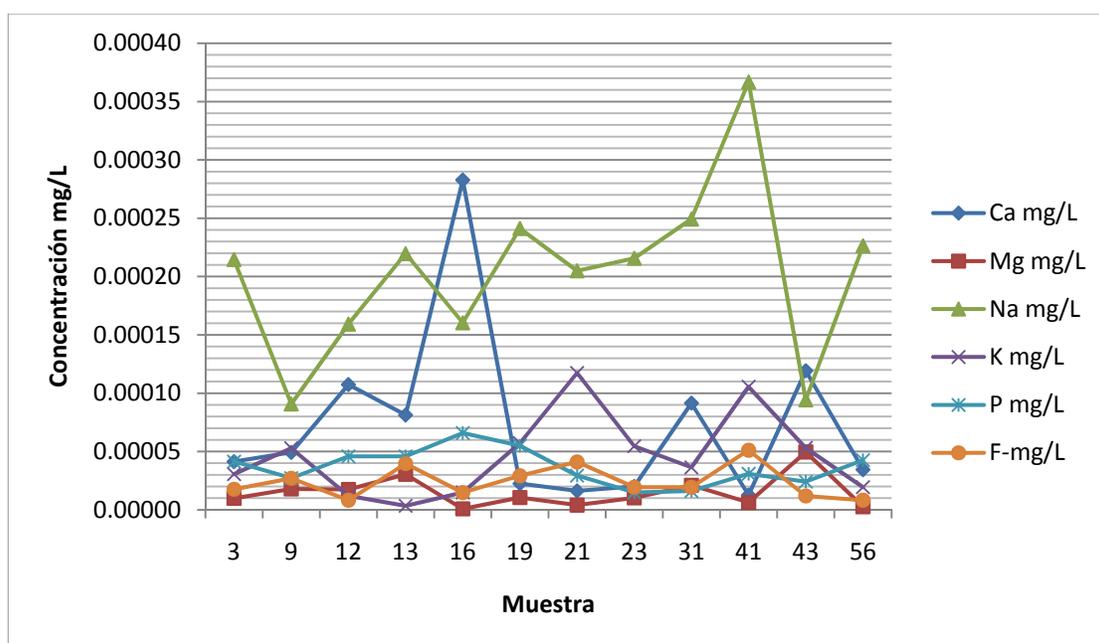
El contenido de flúor sobresale en las muestras, 9 (toba cinerítica), 13 (caliza con pedernal), 23 (pórfido diorítico) y 41 (andesita) que, de acuerdo con el plano de ubicación (Figura 3.1), se distribuyen en la porción oeste de la zona de estudio. Los resultados coinciden con lo que se ha mencionado en el capítulo IV, las rocas con mayor proporción de fluoruros en su estructura son las rocas félsicas y las calizas.

7.3.1.2 Agua destilada

La gráfica 7.3., muestra que en agua destilada el sodio también presenta mayor solubilidad, mientras que el calcio sobresale en las muestras (12, 13, 16, 31, y 43) y el potasio en las (9, 21, 41); el fósforo es el subsecuente en la muestra 12, 16 y 56. El contenido de flúor es relativamente inferior al disuelto en agua de lluvia (ver resultados en Anexo E, tabla E2). La muestra de la que se disolvió mas flúor fue la 41, que corresponde a una andesita, en donde muy probablemente el flúor podría estar asociado al mineral biotita.

En general, fue en el agua destilada donde se detectaron menores cantidades de cationes en solución, esto quizás se debe al tipo de agua en el que fueron disueltos, ya que posee una conductividad eléctrica nula y por consiguiente, una fuerza iónica también nula.

Grafica 7.3 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras de arcilla en *agua destilada*.

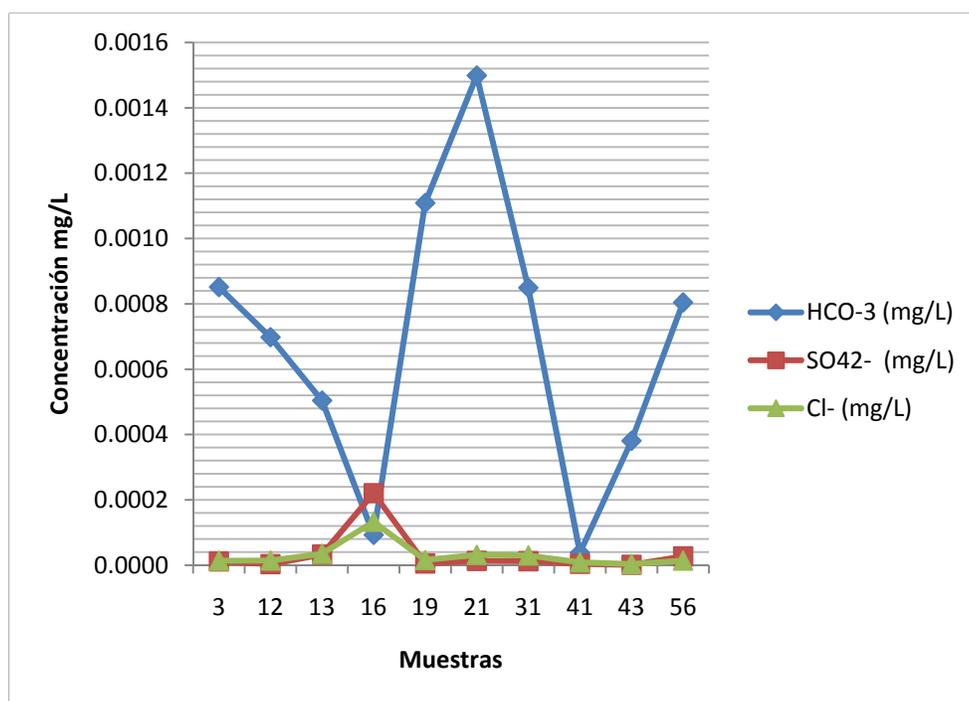


7.3.2 Contenido de aniones en lixiviado de muestras tamaño arcillas

7.3.2.1 Agua de lluvia

El anión con mayor disolución en agua de lluvia fue el bicarbonato, sobre todo en las muestras 19, 21, 31 y 56. El sulfato y el cloruro se manifestaron considerablemente en la muestra 16, en donde hubo poco bicarbonato; esto se debe quizá a que el ácido de azufre predomina sobre el bicarbonato, (Anexo E, tabla E3; Gráfica 7.4).

Grafica 7.4 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en *agua de lluvia*.

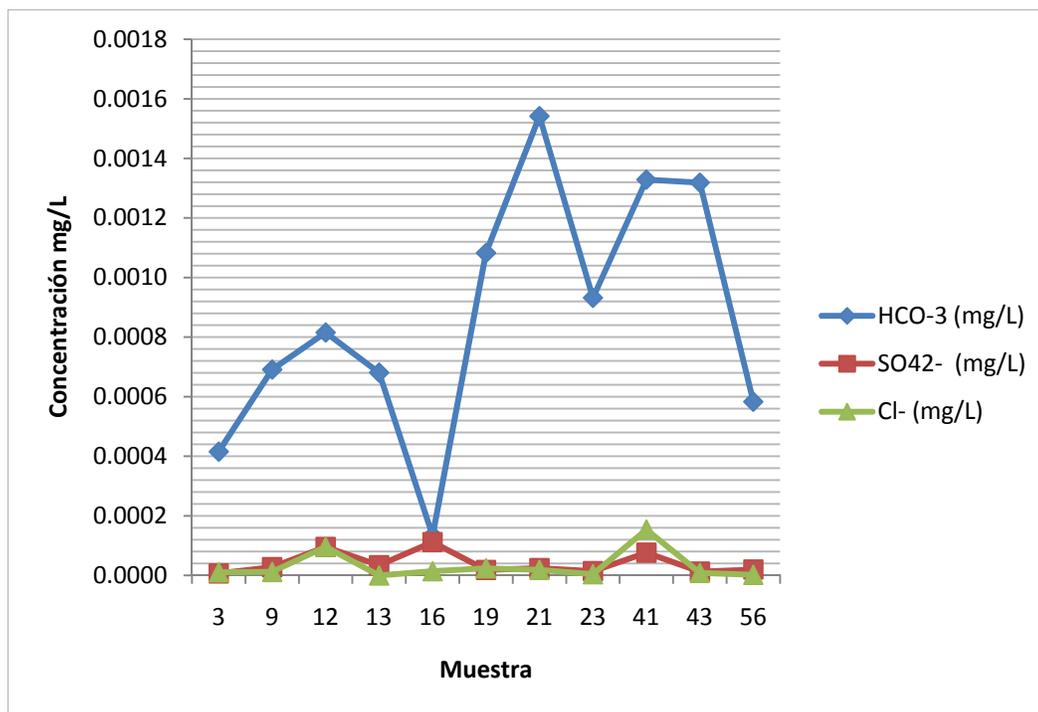


7.3.2.2 Agua de destilada

El anión predominante en disolución fue el bicarbonato, a excepción de la muestra 16, las cantidades disueltas de cloruro y sulfato fueron mínimas en las once muestras, únicamente en las muestras 12 y 41 se detectaron mayores cantidades de cloruros y en la 12, 16 y 41,

mayor cantidad de sulfatos (Tabla E4 Anexo E). Este tipo de agua presentó menor capacidad de disolución (Gráfica 7.5).

Gráfica 7.5 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño arcilla en *agua destilada*.



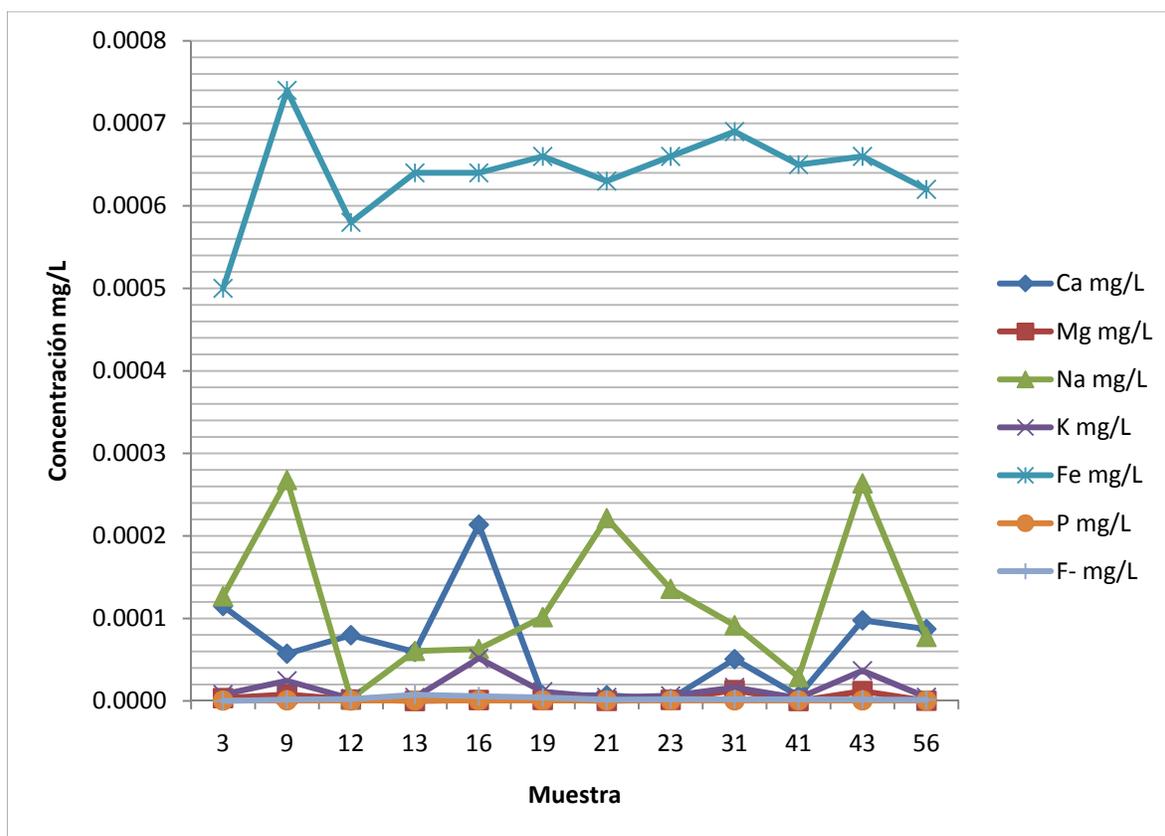
De estos dos gráficos, se observa que la proporción en la disolución de los iones fue ligeramente más alta en el agua destilada, esto podría deberse a que al final del experimento, se obtuvo un pH más alcalino que el agua de lluvia, lo que podría estar beneficiando la disociación mineral-agua. Podemos decir, que el agua destilada muestra resultados ideales de la proporción de iones que puede disolverse de una roca, en cambio el agua de lluvia quizá es más real, pues es el agua que fluye a través de la roca.

7.3.3 Contenido de cationes en lixiviado de las muestras tamaño grava

7.3.3.1 Agua de lluvia

En la gráfica 7.6, se muestra, que en la fracción grava, el sodio y el calcio son aun los de mayor disolución, superado sólo por el hierro. Asimismo, los contenidos disueltos de cationes son menores respecto a los obtenidos en la fracción arcilla, pues debido al tamaño granulométrico, el intercambio catiónico podría estar siendo favorecido. El sodio manifiesta mayor disolución en las muestras 9, 21 y 43; y el calcio en la muestras 16, 3, 43, 12, 9 y 31, estos elementos se asocian con gran facilidad a la molécula del agua y además son elementos muy abundantes en las rocas. El fluoruro presenta un contenido muy pequeño (Tabla E5, Anexo E).

Grafica 7.6 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en *agua de lluvia*.

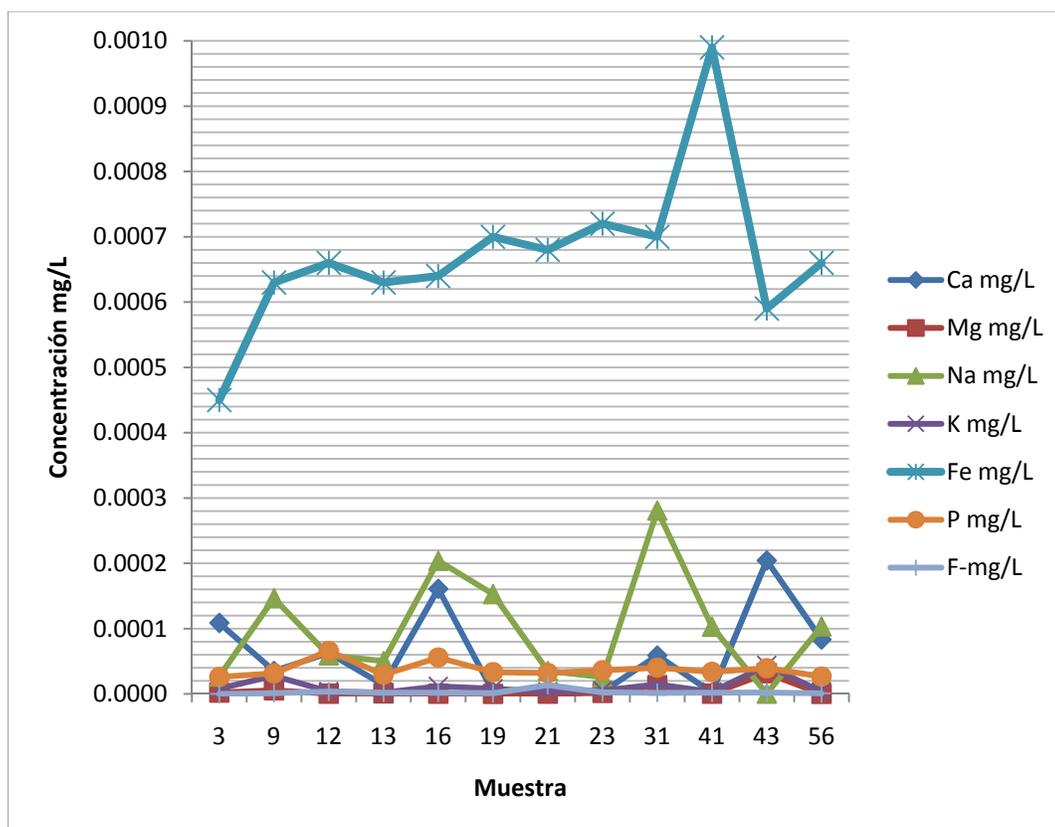


7.3.3.2 Agua destilada

La gráfica 7.7 presenta variaciones similares a la anterior. Las muestras 16, 19 y 31, presentan mayor disolución de sodio con respecto a la gráfica anterior, en las demás muestras la disolución de este catión fue en menor proporción que para agua de lluvia. En cuanto al calcio, la muestra 43 tuvo mayor disolución en agua destilada que en agua de lluvia, para las demás muestras se mantuvieron las mismas cantidades aproximadamente que en el agua de lluvia.

Para este caso, el fósforo fue el tercer catión en mayor disolución, siendo la muestra 12 y 16 las que más lo aportaron, posteriormente, el potasio, magnesio y fluoruro fueron los cationes con menor concentración detectados en el agua de estas muestras (Tabla E6, Anexo E).

Grafica 7.7 Concentraciones de cationes en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en *agua destilada*.



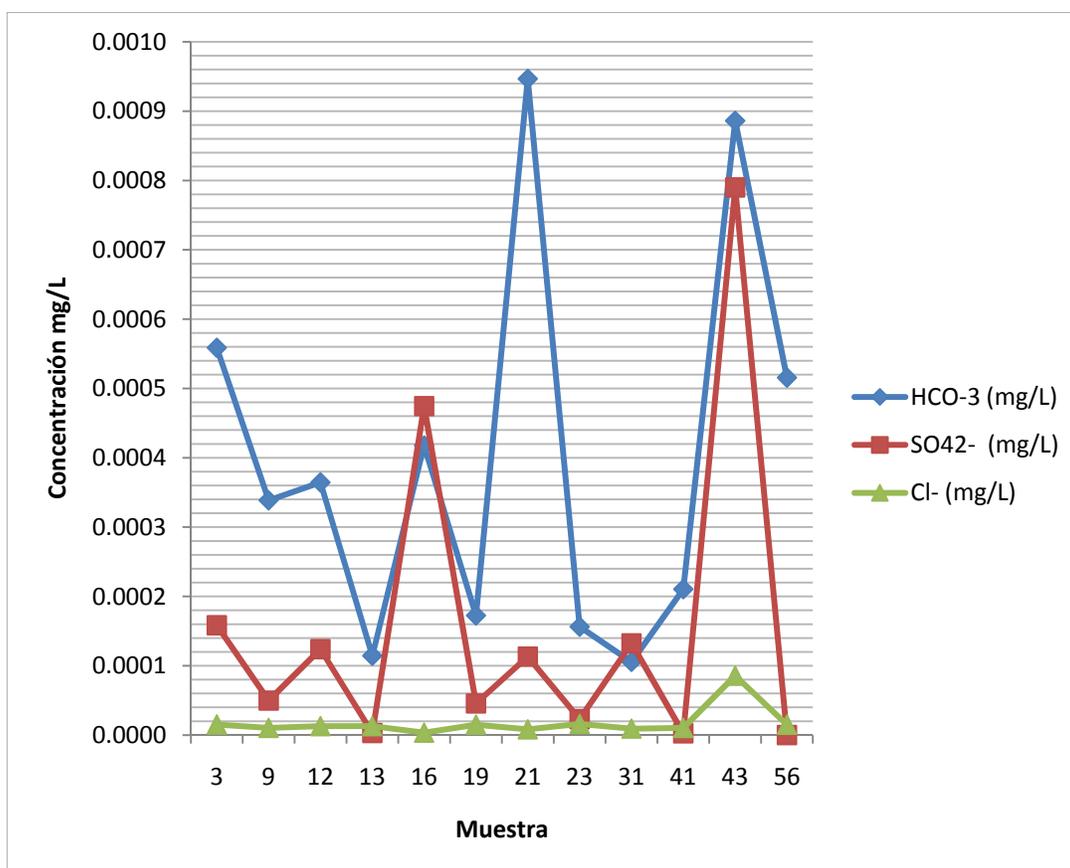
Se observó que el agua de lluvia tuvo ligeramente mayor capacidad de disolución esto se debe a la fuerza iónica que posee (Tabla 7.13) y un pH alcalino.

7.3.4 Contenido de aniones en lixiviado de las muestras tamaño grava

7.3.4.1 Agua de lluvia

Nuevamente el anión predominante es el bicarbonato, las muestras 21 (toba cristalina), 43 (andesita), 3 (caliza) y 16 (sakam), presentan un alto contenido de este anión, seguido por el sulfato, teniendo mayor proporción la muestra 16 y 43, esta última tiene también un contenido importante de cloruro (Gráfica 7.8); en general el cloruro se encuentra en menor proporción para la mayoría de las muestras (Tabla E7, Anexo E).

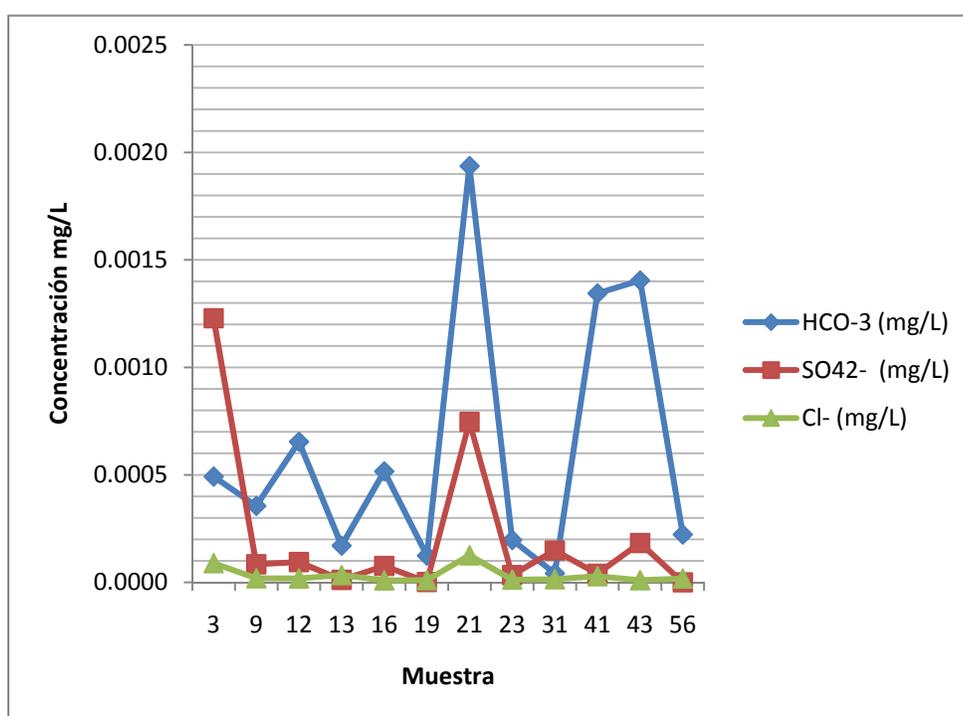
Gráfica 7.8 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en *agua de lluvia*.



7.3.4.2 Agua destilada

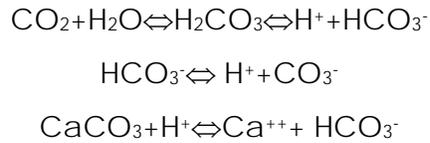
El anión predominante en la disolución de muestras fue el bicarbonato, a excepción de la muestra 3 y 31 donde predominó el sulfato. El segundo anión en disolución fue el sulfato y el que menor manifestación tuvo fue el cloruro, haciéndose notar ligeramente en la muestra 21 (Gráfica 7.9). Ver tabla E8 del Anexo E.

Grafica 7.9 Concentraciones de aniones en el agua del experimento Interacción Agua-Roca para muestras tamaño grava en *agua destilada*.



En lo que respecta al agua de lluvia y al agua destilada, se puede observar, que en la fracción grava, el proceso de disolución de aniones es más eficaz en agua destilada, esto quizá debido a que existe una variación en el pH y la conductividad eléctrica, además de que los espacios intergranulares determinan una mayor aereación del agua y atrapa mayor cantidad de CO₂, que forma tanto bicarbonatos como sulfatos.

Cabe mencionar que el bicarbonato que se manifiesta en todas la muestras proviene de reacciones de combinación del hidrógeno con bióxido de carbono dando como resultado ácido carbónicoy posteriormente bicarbonato. Como lo indica la siguiente reacción:



Estos resultados coinciden con las condiciones naturales, pues como ya se determinó, el agua de la zona de estudio, tiende a ser cálcica/sódica-bicarbonatada.

7.3.5 Flúor en el agua del experimento Interacción Agua-Roca.

En la Tabla 7.16, se observa que la concentración máxima de fluoruro en el agua lixiviada la aportan las rocas volcánicas intermedias a ácidas, ésta varía entre 0.00003 y 0.00006 mg/L, mientras que el menor contenido proviene de rocas menos ácidas y de calizas, la cual oscila entre 0 y 0.000014 mg/L. También se observa, que los pequeños valores de solubilidad de flúor se presentan en las rocas calcáreas y metamórfica, seguramente debido a la presencia de Ca^{2+} . Las muestras con fracción arcilla permitieron mayor disolución de Flúor y el agua de lluvia tuvo mayor efecto, pues posee mayor fuerza iónica. Estos resultados fueron entregados en unidades de $\mu\text{g/g}$; pero con el propósito de facilitar su lectura fueron convertidos a mg/L., por lo que las cantidades resultantes son muy bajas.

Tabla 7.16 Contenido de Flúor obtenido en el lixiviado del experimento interacción agua roca, en rocas de la zona de estudio. Cantidades dadas en mg/L.

No.	Muestra	Arcilla		Grava	
		Lluvia	Destilada	Lluvia	Destilada
3	Caliza	0.00002	0.00002	0.000000	0.000000
9	Toba Cinerítica	0.00006	0.00003	0.000002	0.000001
12	Pedernal	0.00002	0.00001	0.000002	0.000004
13	Caliza con Pedernal	0.00004	0.00004	0.000008	0.000002
16	Skarn	0.00002	0.00001	0.000006	0.000002
19	Abdesita	0.00002	0.00003	0.000004	0.000001
21	Toba Cristalina	0.00003	0.00004	0.000001	0.000014
23	Pórfido Diorítico	0.00005	0.00002	0.000002	0.000002
31	Cuarzo Latita	0.00002	0.00002	0.000002	0.000002
41	Andesita	0.00005	0.00005	0.000002	0.000002
43	Andesita	0.00003	0.00001	0.000002	0.000002
56	Caliza	0.00000	0.00001	0.000001	0.000001

7.4 FLUORURO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REGION DE TENEXTEPANGO

7.4.1 Mecanismos de liberación de Flúor dentro del acuífero

Considerando las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de la región, se pueden considerar dos explicaciones relativas a la liberación de fluoruros en el acuífero: i) la meteorización química de las rocas y ii) la posible existencia de un efecto hidrotermal relacionado a un flujo regional vertical ascendente.

El primer mecanismo está relacionado con la alteración de las rocas ígneas a través de la disolución, que incluye una serie de reacciones químicas como la hidrólisis, la hidratación y la oxidación.

Durante el proceso de disolución se lleva a cabo la disociación de las moléculas en iones debido al agua que actúa como agente disolvente; no obstante, este proceso no implica ninguna transformación en la composición química del material disuelto.

En cambio, la hidrólisis, es el principal proceso químico que da lugar a la alteración de los minerales que se presentan, en ésta se llevan a cabo los siguientes aspectos: 1) rotura de la estructura del mineral, debido a su pequeño tamaño y a su gran movilidad, los iones H^+ se introducen con facilidad en las redes cristalinas, lo que produce la pérdida de su

neutralidad eléctrica; para recuperarla, el cristal silicatado tiende a expulsar a los cationes, cuya carga es también positiva; como consecuencia, la estructura cristalina colapsa, y se liberan también los aniones, como el caso de los fluoruros; 2) lavado o lixiviado de una parte de los iones liberados, que son transportados por el agua fuera de la roca meteorizada; 3) neoformación de otros minerales, por la unión de iones que dan como resultado compuestos insolubles. Durante la interacción agua-roca, el H^+ que se intercambia, proveniente de la disociación del ácido carbónico que se forma durante el proceso natural de recarga del agua subterránea. De este modo el bicarbonato está en relación directa con el consumo de iones hidrógeno durante el intercambio de cationes, reacción que incrementa el pH.

Adicionalmente al proceso de disolución de los principales minerales normativos que constituyen a las rocas de la zona en estudio (plagioclasas, cuarzo y calcita), el contenido de Na^+ en el agua subterránea puede incrementarse debido al intercambio iónico, y ocasionar que la concentración de Ca^{2+} , disminuya sensiblemente.

Paralelamente, como resultado de la disolución de minerales que contienen flúor, se tendrá la presencia de fluoruro en el agua.

El segundo mecanismo posible de liberación de fluoruros dentro del acuífero es por recarga a través de un flujo regional vertical ascendente, en el cual la temperatura es muy importante, y se considera que se presenta en el volcán Popocatepetl; a este respecto, este estudio indica que existe flujo subterráneo procedente desde la ladera de ese volcán, y no obstante que los sitios muestreados no presentan temperaturas altas que sugieran una relación directa con flujo regional, pues varía de tibia a moderadamente caliente. Sin embargo, el inicio del problema de fluorosis dental en la zona, coincide con la reactivación de dicho volcán, esto permite decir, que parte del fluoruro procede desde esa estructura volcánica donde asciende y es transportado ladera abajo, llegando a la zona de interés en un flujo local-intermedio de agua templada.

Mientras que, al interior del área de interés el aporte de fluoruro estará en función del contenido de fluorita de las rocas ígneas intermedia ácidas, y del efecto de la temperatura.

7.4.2 Procesos naturales que controlan la ocurrencia del fluoruro en el acuífero

De acuerdo con los mecanismos de liberación antes mencionados, la presencia de fluoruro en el agua subterránea de esta zona sería:

Caso 1). Meteorización química de las rocas ígneas, infiltración-recarga y transporte de agua fría a través de un flujo local.

El fluoruro liberado en este primer mecanismo, una vez incorporado al sistema de flujo del acuífero, es transportado por el propio movimiento del agua, en la dirección del flujo. Sin embargo, la tortuosidad del terreno influirá y los fluoruros tenderán a separarse de la trayectoria ideal del agua y a moverse con diferente velocidad, originándose una dispersión mecánica o hidráulica.

Una evidencia de esto sería considerar la trayectoria del flujo relacionada con las muestras de Tenextepango, Leopoldo Heredia y Buenavista, donde la concentración de fluoruro varía de 1.9 mg/l, en la primera, 1.05 mg/l en la segunda, y 0.84 mg/l en la tercera.

Caso 2). Meteorización química de las rocas ígneas, infiltración-recarga y transporte de agua moderadamente caliente a través de un flujo vertical ascendente.

Aquí el transporte de fluoruros se realizará mediante la difusión; su efecto es la tendencia a la igualación de concentración en cualquier parte del sistema. Posteriormente, el movimiento del fluoruro se llevará a cabo a través de una combinación de la dispersión hidráulica y la difusión molecular, denominada dispersión hidrodinámica.

Aquí se denotaría la existencia de una mezcla de agua como se observa en la mayoría de las muestras aquí analizadas.

7.4.3 Procesos que afectan la movilización y transporte de fluoruros en el acuífero

- i) Meteorización química de las rocas ígneas, infiltración-recarga y ii) transporte de agua fría a través de un flujo local.*

De acuerdo con los valores de la tabla 7.4 y 7.5, se observa que existe una buena relación F^- - Ca . También se observa buena relación de fluoruro y dureza, así como con la temperatura, en algunos pozos. Esto permite decir que la movilidad del fluoruro tiene dependencia de la cantidad de sales disueltas, dureza en calcio, temperatura, y la existencia de materiales que hacen posible el intercambio iónico en el medio circundante.

De acuerdo con Hem (1985), la afinidad del F^- por el Ca^{2+} (elemento muy difundido) hace que estos se unan para formar el fluoruro de calcio; sin embargo, si el agua continúa disolviendo sales cálcicas o al efectuarse un cambio de bases, se precipita el CaF_2 ; por lo que la tendencia es que el contenido de F^- en el agua subterránea se incrementa cuando decrece el contenido de Ca^{2+} .

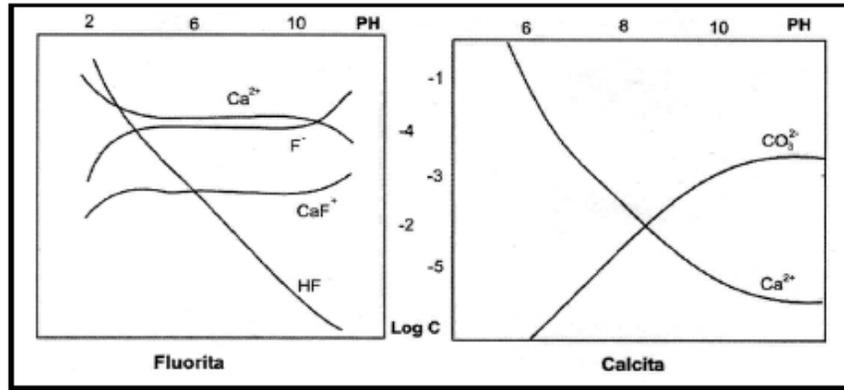
Esto se visualiza mejor cuando se observa la relación que existe entre los valores de la actividad iónica de fluoruro y calcio (Fetter, 1993). Donde a mayor actividad de calcio mayor contenido de este y en consecuencia menor contenido de F^- (Tabla 7.11).

Tabla 7.17 Equilibrio del Fluoruro en función de la actividad del Calcio (Tomado de Fetter, 1993).

Calcio		Fluoruro	
Actividad (mol)	Concentración (mg/l)	Actividad (mol)	Concentración (mg/l)
2×10^{-2}	800	4048×10^{-5}	0.85
10^{-2}	400	6.31×10^{-5}	1.20
5×10^{-3}	200	8.92×10^{-5}	1.70
10^{-3}	40	2.00×10^{-4}	3.79
5×10^{-4}	20	2.82×10^{-4}	5.36
10^{-4}	4	6.31×10^{-4}	11.99

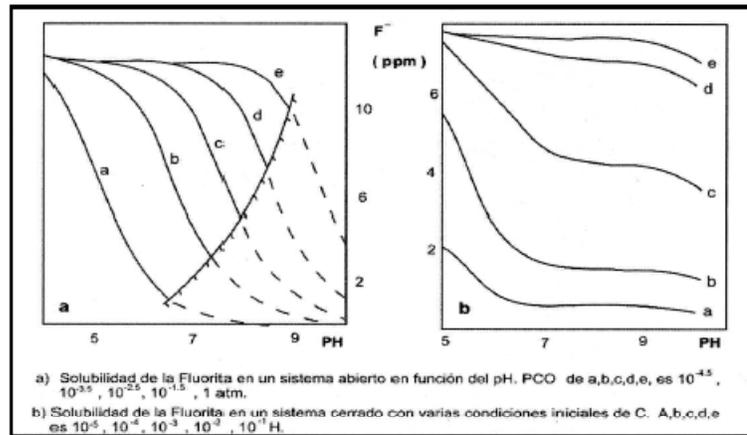
A su vez Shen *et al.*, (1989), en sus experimentos sobre la solubilidad de fluorita y de calcita, demostraron que : i) el contenido de F^- en el agua subterránea generalmente es bajo en un ambiente ácido, cambia en una situación neutral y es grande en un ambiente alcalino; ii) las características de solubilidad de la fluorita varían al cambiar el contenido de CO_2 y la concentración de Ca^{2+} , en un sistema acuoso con temperatura y presión atmosférica normales, como se muestra en la figura 7.4, y al considerar que la solución de la fluorita en un agua que contiene CO_2 en solución ($CaF_2-CO_2-H_2O$), demostraron que la habilidad del

enriquecimiento del flúor en solución en un sistema cerrado es pequeña en comparación con un sistema abierto (figura 7.5); además de que el contenido de CO₂ en solución en un agua podría producir un cierto efecto en el transporte del Flúor.



Fuente: Shen *et al.*(1989).

Figura 7.4. Solubilidad de la fluorita y calcita en un agua pura a presión y temperatura atmosférica normal.



Fuente: Shen *et al.*(1989).

Figura 7.5 Solubilidad de la fluorita en un sistema abierto y en uno cerrado

Lo anterior, permite decir que el mecanismo de liberación de fluoruro en el agua de la zona, es a través de la meteorización química de las rocas sedimentarias e ígneas sobre todo las ácidas, posteriormente, infiltración-recarga y transporte de agua fría a través de un flujo local. Para los pozos con los altos contenidos de fluoruro, se considera que es mediante la meteorización química de las rocas ígneas y transporte de agua térmica, a través de un sistema de flujo vertical ascendente en la ladera del Popocatepetl, fluyendo posteriormente pendiente abajo, y llega a los pozos como un flujo sistema intermedio, tibio. Asimismo, el incremento de la población en el área de interés y sus inmediaciones, ha aumentado la demanda de agua potable, y obliga a extraer mayor cantidad de agua subterránea para el abasto, originando que se bombé agua de mayor profundidad, lo que a su vez ha inducido la captación de un sistema de flujo más profundo, con un contenido de fluoruro sensiblemente mayor al que antes captaban los pozos. Es decir, ha pasado de un flujo local a intermedio. En efecto hay sitios como E. Zapata, Axocoche y Rellers, que aún captan el sistema local y su contenido de fluoruro es bajo.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

La columna estratigráfica del área estudiada está compuesta por: lutitas, calizas y dolomía, (Formaciones Morelos y Cuautla); conglomerado calcáreo-volcánico (Grupo Balsas); cuerpos intrusivos de edad Terciaria con aureola de metamorfismo que forma un cuerpo metamórfico; rocas andesitas, basaltos, dacitas, tobas, dioritas, sienita, ignimbritas y riolitas del Terciario (Grupos Ixtlilco y Tlaica); (Fries, 1960). Finalmente, sedimentos aluviales del Cuaternario (Formación Tlayecac).

En este estudio se puso énfasis en la cartografía de la litología que integra al Grupo Ixtlilco, ya que Fries (1960), únicamente menciona las diferentes roca que lo integran, por esto y por ser necesario para entender más la hidroquímica del agua subterránea local, se dedicó tiempo a esta tarea. El grupo está formado por una secuencia volcánica diferenciada donde se identificaron y cartografiaron basaltos, andesitas y dacitas en zonas que corresponden al área de estudio.

La interpretación tectónica - estructural obtenida, muestra que los lineamientos identificados e interpretados se asocian a fallas y fracturas, cuya orientación promedio predominante está entre NW 30° y 70 SE, los hay también de orientación NE 10° y 20 SW, y con una frecuencia menor en dirección W-E y N-S.

Muchos de estos rasgos tiene longitudes locales y otros son de extensión regional afectando a las unidades litológicas; como la falla lateral Jojutla, el lineamiento Tepoztlan-

Atotonilco, sobre el cual surgió un alargado cuerpo intrusivo que forma el límite oriental del área estudiada y, la falla "lateral izquierda" Chinameca a cuyo efecto se piensa esté asociada la curvatura hacia el SE del cerro El Castillo, y trunca la continuidad de los pliegues calcáreos hacia el sureste. Esta falla cruza la zona estudiada en dirección NE-SW. Las numerosas fallas y fracturas reconocidas en campo, afectan a todas las rocas aquí cartografiadas, e influyen en sus propiedades hidrogeológicas.

El truncamiento de las estructuras calcárea hacia el sureste, el emplazamiento del relieve ígneo en la parte oriente y el volcanismo de la parte sur, permite suponer que la planicie de Tenextepango corresponde a una depresión tectónica.

Hidrogeológicamente, se establece la existencia de dos acuíferos en una secuencia rítmica y comunicados hidráulicamente. El primero acuífero superior es de tipo intergranular, presenta valores de conductividad hidráulica que varían entre 10^{-2} y 10^{-6} m/s, que es el que actualmente abastece a la población local. El segundo es un acuífero fisurado que subyace al anterior, cuyos valores de conductividad varían entre 10^{-3} y 10^{-6} m/s. El modelo hidrogeológico sugiere que estos acuíferos ocupan una depresión tectónica, que no obstante tienen comunicación hidráulica con el exterior, por sus lados NE, SE, SW, y N.

La configuración de las líneas equipotenciales, indica que la dirección del flujo subterráneo es noreste a suroeste. Existe flujo procedente del exterior, desde las laderas del Popocatepetl y de la sierra Chichinautzin, así como del norte de la zona de estudio.

La información geológica e hidroquímica, sugieren que la recarga de estos acuíferos se asocia a sistemas de flujo de tipo local y de tipo intermedio. El primero es función de la infiltración-recarga en la topografía inmediata; mientras que, el segundo, está relacionado con la recarga a través de un flujo que desciende desde la ladera del Popocatepetl y que aporta agua tibia.

La química del agua del acuífero intergranular presenta principalmente dos facies hidrogeoquímicas principales que son: cálcica bicarbonatada y sódica bicarbonatada.

El contenido del fluoruro en el agua que extraen los pozos, varía de 0.2 a 1.9 mg/L; el máximo contenido de fluoruro proviene de las rocas ácidas y carbonatadas. Al relacionar

su contenido con el marco geológico, se deduce que este se asocia con un medio que geoquímicamente tiende a ser alcalino, que es el que predomina en el área de estudio.

Las especies iónicas y sus concentraciones, así como su interacción con minerales ricos en fluoruro y su tiempo de residencia, son importantes en el control de los procesos de disolución de fluoruro. Las condiciones de alcalinidad (pH entre 6 y 8.1), una conductividad eléctrica (0.4 a 10 mS/cm), una temperatura tibia (17° a 30°C) y la dureza son favorables para la disolución de fluoruro en el agua de Tenextepango.

La disolución de cationes es más activa en agua de lluvia, en la fracción arcilla, mientras para aniones lo es en la fracción grava. Esto se interpreta que las muestras fracción arcilla presentan mayor superficie de contacto y el pH del agua influye en la disolución de iones. Mientras que la fracción grava permite mayor aereación y la presencia de CO₂ propicia la formación de HCO₃. El orden en cuanto a cantidades de disolución (mayor a menor) fue el siguiente: sodio, potasio y calcio, seguido de bicarbonato.

Respecto a la disolución del Flúor, se aprecia que esta fue muy similar en ambos tipos de muestra (fracción arcilla y fracción grava) sin embargo, se observa ligeramente más eficaz en la fracción arcilla. La cantidad de flúor proveniente de las rocas obtenida por disolución en el experimento de interacción agua-roca, es muy pequeña, esto quizá debido a la proporción cantidad de roca-cantidad de agua, por lo que extrapolando a dimensiones reales, es una cantidad considerable.

El primer mecanismo de liberación de fluoruro en el agua está relacionado con la meteorización química de las rocas ígneas ácidas, infiltración-recarga y transporte de agua fría a través de un flujo local. El segundo mecanismo se considera está relacionado con el aporte de un flujo regional vertical ascendente en el volcán Popocatepetl, que desciende ladera abajo y llega a la zona de Tenextepango como un flujo tibio- intermedio

Para abastecer de agua a la población, en algunos casos es necesario extraer el agua subterránea cada vez a mayor profundidad. Esto da como resultado la captación de sistemas de flujo con mayor contenido de minerales disueltos, que para el presente caso, presenta un mayor contenido de fluoruro, que es captado por los pozos al extraer esa agua.

Como conclusiones adicionales, es necesario destacar que la experiencia obtenida al realizar el experimento de interacción agua-roca (lixiviación de minerales), señala la necesidad de realizarlo con una relación de soluto (roca) y solvente (agua destilada) mayor a la utilizada, (50 gr de roca por 180 ml de agua); en vista de que el volumen final de agua obtenido resulto ser pequeño; inhibiendo esto, la posibilidad de hacer las determinaciones químicas en cuando menos dos diferentes laboratorios, que permitieran verificar los resultados obtenidos a través de la técnica de electrodo selectivo, que fue el caso particular del fluoruro.

También se debe decir, que para obtener resultados mucho mejores de un experimento como el realizado en este estudio, es necesario disponer de un laboratorio con un equipamiento tal que permita entre otras cosas, controlar la temperatura del sitio, disponer de recipientes en los cuales sea posible hacer mediciones fisicoquímicas (pH, Temperatura, conductividad) a diferentes tiempos, sin poner en riesgo el experimento mismo; y de esta forma, lograr que el experimento se realice en condiciones más cercanas a las naturales.

En cuanto a los tiempos obtenidos de lixiviación del flúor en diversas rocas ígneas, dado que éstos fueron determinados en laboratorio a temperatura y presión ambiental, se estima que los valores resultantes son de carácter indicativo.

No obstante, las inconveniencias anteriores, así como aquellas de carácter presupuestario, los resultados aquí obtenidos son aceptables, ya que proporcionan información relevante acerca de la velocidad de disolución de flúor y otros iones, en dos formas de concentración iónica del agua (lluvia y destilada).

Las limitantes presupuestarias fueron determinantes para el desarrollado de esta investigación. Ya que, para obtener cuantificaciones precisas acerca del contenido de flúor en roca, se requiere de equipo muy especializado, para este caso el empleo de la microsonda es excelente, sin embargo, el empleo de este equipo es costoso, por esta razón, solo se realizaron barridos aleatorios en las muestras de roca, hecho que no impidió que se obtuvieran resultados aceptables.

En general se puede decir, que tanto el método propuesto como su desarrollo fueron los adecuados solo que faltó más presupuesto y un poco más de tiempo para obtener mejores resultados. Tanto el problema como los objetivos propuestos fueron bien cubiertos.

8.2 RECOMENDACIONES

Es necesario que los habitantes reduzcan o se abstengan de consumir todo producto líquido o sólido que contenga fluoruro, a la vez que implementen una dieta con mayor contenido de calcio.

Existen muchas hipótesis respecto de la cantidad de enfermedades en las que el flúor puede coadyuvar a afectar la salud del ser humano, por ello, es necesario motivar a las diferentes dependencias encargadas a preservar la salud de la población, a que realicen con mayor frecuencia y sobre todo más completos los diagnósticos patológicos respecto de la prevención y consumo no solo de fluoruro, sino de todos aquellos elementos químicos potenciales de perjudicar la salud del ser humano, y de esta manera, establecer la cantidad permisible de flúor u otro elemento en el agua de consumo, en vez de adoptar estándares internacionales. Esto mediante estudios de dosis-respuesta en las poblaciones de México, ya que en eso influyen varios factores siendo uno de ellos el nutricional.

Es necesario hacer obligatorio y vigilar, que en todo análisis de agua para consumo humano se cumpla, con la NOM 127 (Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización).

IncurSIONAR en evaluar la posibilidad de poner en marcha un proceso de tratamiento del flúor en el agua que consume la población. Como son:

- Ablandamiento con cal
- Coagulación con aluminio
- Alúmina activada
- Resinas de intercambio iónico
- Ósmosis inversa
- Hueso molido

BIBLIOGRAFIA

- Aguayo Camargo, J. E., Marín Córdova, S., 1987. Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos post-Cretácicos de México. *Boletín de la Soc. Geol. Mex.* Tomo XLVIII (2):15-39.
- Aguilera-Franco, N., P. A. Allison, N. MacLeod. 1998a. The stratigraphy and environmental change associated with the Cenomanian-Turonian boundary of Southern Mexico. Abstract 15th International Sedimentological Congress, International Association of Sedimentology, Alicante: 117-118.
- Aguilera-Franco, N., U. Hernández-Romano, M. Martínez-Medrano, J. Barceló-Duarte. 1988b. Cambios litológicos, paleontológicos y paleoambientales registrados a través del límite Cenomaniano-Turoniano en la región de Zotoltilán-La Esperanza, Estado de Guerrero. *Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología* 8, pp. 107-122.
- Aguilera-Franco N., H. Alzaga-R., J.L. Macías-V., D. Zamudio-A. 1992. Bioestratigrafía de la formación Apango (Turoniano-Santoniano) en el Estado de Guerrero, al sureste de México, in XI Convención Geológica Nacional, Veracruz, Sociedad Geológica Mexicana, p. 5.
- Aguilera-Franco, N., 1995. Litofacies, paleoecología y dinámica sedimentaria del Cenomaniano-Turoniano en el área de Zotoltilán-La Esperanza, Estado de Guerrero: México. M en C. Tesis. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM., 137 pp.
- Aguilera-Franco, N. 2000. High resolution stratigraphy and paleocology of Cenomanian-Turonian succession southern Mexico. Ph. D. Thesis, University of London, 202 pp.
- Aguilera-Franco, N. 2003. Cenomanian-Coniacian zonation (foraminifers and calcareous algae) in the Guerrero-Morelos basin, southern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3): 202-222.
- Aguilera-Franco, N.; U. Hernández-Romano. 2004. Cenomanian-Turonian facies succession in the Guerrero-Morelos Basin, Southern Mexico. *Sedimentary Geology* 170:135-162.
- Alaniz-Álvarez, S.A., A.F. Nieto-Samaniego, D.J. Morán-Zenteno, L. Alba-Aldave. 2002. Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118: 1-14.
- Alencáster, G., R. Hernández-García, V. García-Villegas. 1987. Rudistas hipuríticos (Bilvia-Hippuritacea) del Cretácico Superior de la parte central del Estado de Guerrero. *Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología*, 1: 21-39.
- Aliota, P., M. Celis, D. Juárez, G. Merli, N. Ricciuti, N. Salinas, A. Siles, C. Stoklas, C. Suquele. 2008. Potabilización de aguas subterráneas: Remoción de flúor. "Seminario agua" Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental Facultad Regional Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional - U.T.N. Argentina.
- Angelis M. and M. Legrand. 1994. Origins and variations of fluoride in Greenland precipitation. *J Geophys Res.*, 99(D1):1157-1172.

- Armienta M. A. and N. Segovia. 2008. Arsenic and Fluoride in the groundwater of México. *Environ. Geochem. Health*, 30:345-353.
- APHA. 1989. *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater* (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (17th edn). Public Health Association Washington D.C.
- Appelo, C.A.J. y Postma, D. 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam, 535 pp.
- Aswathanarayana U., P. Lahermo, E. Malisa, J.T. Nanyaro. 1985. High fluoride waters in an endemic fluorosis area in Northern Tanzania. In Thornton I (ed) *Proceedings of the 1st International Symposium on Geochemistry and Health Monograph Series: Environmental Geochemistry and Health*, p. 243-249.
- Awadia A.K., J. M. Birkeland, O. Haugejorden, K. Bjorvatn. 2000. An attempt to explain why Tanzanian children drinking waters containing 0.2 or 3.6 mg fluoride per liter exhibit a similar level of dental fluorosis. *Clin. Oral Investig.* 4(4):238-244.
- Banks D., C. Reimann, O. Royset, H. Skarphagen, O. M. Saether. 1995. Natural concentrations of major and trace elements in some Norwegian bedrock groundwaters. *Appl. Geochem.* 10:1-16.
- Bird, P. 1988. Formation of the Rocky Mountains western United States: a continuum computer model. *Science*, 239: 1501-1507.
- Bernstein D. S., N. Sadowsky, D. M. Hegsted, C. D. Guri, P. J. Stare. 1966. Prevalence of osteoporosis in high and low fluoride areas in North Dakota. *JAMA*. 198:499-504.
- Bonet, F. 1956. Excursión espeleológica; visita a las grutas de Cacahuamilpa y otras grutas y cavernas de los estados de México y Morelos: 20° Cong. Geol. internal. México. Libro-guía Excursión C-14, inédito.
- Bonilla-Petriciolet, A., R. Trejo-Vázquez, C. Márquez-Algara. 2002. Análisis del riesgo para la salud pública ocasionado por la exposición a fluoruros en el estado de Aguascalientes, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 18(4):171-177.
- Brownslow A. H. 1996. *Geochemistry*. PrenticeHall; New Jersey, 580 pp.
- Calderon, J., B. Machado, M. Navarro, L. Carrizales, M. D. Ortiz, F. Diaz-Barriga. 2000. Influence of fluoride exposure on reaction time and visuospatial organization in children. *Epidemiol.* 11(4):S153.
- Campa, M. F., Oviedo, A., Tardy, M., 1976, La cabalgadura laramídica del dominio volcánico-sedimentario (Arco de Alisitos-Teloloapán) sobre el miogeosinclinal mexicano en los límites de los estados de Guerrero y México, en III Congreso Latinoamericano de Geología, Resúmenes: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 23.
- Cantagrel, J. M. and C. Robin. 1979. K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks-Relations between the andesitic and alkaline provinces. *J. Volca and Geother. Res.*, v.5, p.99-114.
- Cardona-B. 2000. Medición de parámetros hidrogeoquímicos y Toma de muestras de agua subterránea. Informe inédito 26 pp.

- Carrillo-Rivera J.J., A. Cardona, W. M. Edmunds. 2002. Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *J. Hydrol.* 261:24–47.
- Carrillo-Rivera, J.J., Huizar-Alvarez, R., Cardona B.A., Gricelda G., Varela G., Graniel, C.E., Gerardo Zenteno. 2007. Impactos ambientales relacionados al uso ineficiente del agua subterránea en México. *Nuevo Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía. Univ. Nal. Auto. Mex. Mapa NA XI-1 y Texto
- Cerca-Martínez, M. 2004. Deformación y magmatismo Cretácico Tardío-Terciario temprano en la zona de la Plataforma Guerrero Morelos. Ph. D Tesis, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, 175 pp.
- Cerca-Martínez, M., L. Ferrari, M. Bonini, G. Corti, P. Manetti. 2004. The role of crustale heterogeneity in controlling vertical coupling during the Laramide shortening and the development of the Caribbean-North American transform *in* southern Mexico; insights from analogue models, in Grocott, J., G. Taylor, B. Tikoff (editores), *Vertical Coupling and Decoupling in the Lithosphere: Geological Society London, Special Publication*, 227:117-140.
- Cserna Z. de. 1987. Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. *Univ. Nal. Autón. Méx. Inst. Geol. Vol.* 104.
- Custodio E. y M. R. Llamas. 1983. *Hidrogeología Subterránea*. Tomo 1. Segunda edición. Ediciones Omega, Barcelona, 1157 pp.
- Chae, G. T., S. T. Yun, K. Kim, B. Mayer. 2006. Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrockgroundwater in the Pocheon spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing. *Journal of Hydrogeology* 321: 325-343.
- Chae, G. T., S. T. Yun, M. J. Kwon, Y. S Kim, B. Mayer. 2006b. Batch dissolution of granite and biotite in water: implication for fluorine geochemistry in groundwater. *Geochem J.* 40(1):95–102.
- Chae, G. T, S. T. Yun, B. Mayer, K. H. Kim, S.Y. Kim, J. S. Kwon, K. Kim, Y. K. Kohn. 2007. Fluorine geochemistry in bedrock groundwater of South Korea. *Sci. Total Environ.* 385(1–3):272–283.
- Chang, R. 2003. *Química*. Séptima Edición McGraw-Hill, Colombia, 1064 pp.
- Chamosa, S., E. Taracido, M. Trank, J. Otero.1992. *El flúor en la Prevención de la Caries_Dental*. Edición Díaz de Santos, S.A. Madrid España, 33-58 pp.
- Craig H. 1961a. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133:1702–8.
- CONAGUA.2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cautla-Yautepec, Estado de Morelos. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F., 49 p.
- Dávila-Alcocer, V. 1974. *Geología del área de Atenango del Río, Estado de Guerrero: México*. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM, 109 p.
- Dean, H.T. 1938. Endemic fluorosis and its relation to dental caries. *Public Health Rep.* 53:1413 . En: Smyth Chamosa E., Taracido Trunk M., Gestal Otero J. J. 1992. *El flúor en la prevención de la caries dental*. Dias de Santas, Madrid, España, 112 pp.
- Del Razo L. M., J. C. Corona, G. Garcia-Vargas, A. Albores, M. E. Cebrián. 1993. Fluoride Levels in Well-Water from a Chronic Arsenicism Area of Northern Mexico. *Environmental Pollution* 80:91-94.

- Demant, A. 1982. Interpretación geodinámica del volcanismo del eje neovolcánico transmexicano. *Rev. Inst. Geol, UNAM*. 5(2):217-222.
- Demek, J., C. Embleton, J. F. Gellert, H. T. Verstappen,. (Eds.). 1972. *Manual of Detailed Geomorphological Mapping*. International Geographical Union Commission on Geomorphological Survey and Mapping. Academia, Prague.
- Díaz Bravo, B. A. 2005. *Estratigrafía Volcánica y Estructuras Tectónicas de la Porción Norte de la Sierra de Huautla, Estado de Morelos*. 2005. Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, 76 pp.
- Díaz-Barriga F., R. Leyva, J. Quistian, J. P. Loyola-Rodríguez, A. Pozos, M. Grimaldo. 1997. Endemic fluorosis in San Luis Potosi, Mexico. IV Sources of fluoride exposure. *Fluoride*. 30:219-222.
- Dickinson, W. R., Klute, M. A., Hayes, M. J., Janecke, S. U., Lundin, E. R., McKittrick, M. A., Olivares, M. D. 1988. Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region. *Geological Society of America Bolletin*, 100, 1023-1039
- Dissanayake C. B. and R. Chandrajith. 2009. *Introduction to Medical Geology. Focus on tropical environments*. Springer, Krips, The Netherlands, p. 59.
- Dolejs, D. and D. R. Baker. 2004. Thermodynamic analysis of the $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{F}_2\text{O}$ -₁ system: Stability of fluorine-bearing minerals in felsic igneous suites. *Contrib. Mineral Petrol*. 146(6):762-778.
- Domenico, P. A. y F. W. Schwartz. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 505 pp.
- Doull J., K. Boekelheide, B. G. Farishian, R. L. Isaacson, J.B. Klotz, J.V. Kumar. 2006. *Fluoride in drinking water: a scientific review of EPA's standards*, Committee on Fluoride in Drinking Water, Board on Environmental Studies and Toxicology, Division on Earth and Life Sciences, National Research Council of the National Academies. National Academies Press, Washington, DC, 530 pp.
- Dowgiallo J. 2000. Thermal water prospecting results at Jelenia Góra-Cieplice (Sudetes, Poland) versus geothermometric forecasts. *Environ. Geol*. 39:433-6.
- Edmunds, W. M. and P. L. Smedley. 2005. Fluoride in natural waters In: O. Selinus (editor). *Essential of Medical Geology*. Elsevier Academic Press, Burlington, M. A., 301-329 pp.
- Edmunds, W.M. 1981. Hydrogeochemical Investigations. In: J.W. Lloyd (editor). *Case-studies in groundwater resources evaluation*. Clarendon press, Oxford, 87-112.
- Ellis A. J. and W. A. J. Mahon. 1977. *Chemistry and geothermal systems*. Academic Press, New York, 392 pp.
- Food and agriculture Organization of the United Nations. 2010. <http://www.fao.org>
- Fawell, J., K. Bailey, J. Chilton, E. Dahi, L. Fewtrell, Y. Magara. 2006. *Fluoride in Drinking-water*. World Health Organization, London, 144 pp.
- Feeter, C. W. 1993. *Contaminant Hydrogeology*. Mac Millan, Pub. Com., US, 457 pp.
- Freni, S. C. 1994. Exposure to high fluoride concentrations in drinking water is associated with decreased birth rates. *J. Toxicol. Environ. Health*, 42(1):109-121.

- Fries, C. Jr., C. W. Hibbard, D. H. Dunkle. 1955. Early Cenozoic vertebrates in the red conglomerates at Guanajuato, Mexico. *Smithsonian Institution, Misc. Coll.* 123(7):1-25.
- Fries, C. Jr. 1960. Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. *Boletín 60, Instituto de Geología, México*, 236 pp.
- Fries, C. Jr. 1966. Hoja Cuernavaca 14Q(8), Resumen de la Geología de la hoja Cuernavaca, Estado de Morelos. UNAM, Instituto de Geología. Serie 1:100 000. Mapa con texto.
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 604 pp.
- García-Palomo, A., J. L. Macías, V. H. Garduño. 2000. Miocene to Recent structural evolution of Nevado de Toluca Volcano Region, Central México. *Tectonophysics*, 318: 218-302.
- García Enriqueta. 1997. *Cartas de Climas de México. Sistema de Köppen, modificado por E. García. Escala 1:1 000 000. Proyecto FO47, MAPA DE CLIMAS, CONABIO /ESTADIGRAFÍA.*
- Gizaw B. 1996. The origin of high bicarbonate and fluoride concentration in waters of the Main Ethiopian Rift Valley, East African Rift system. *J Afr Earth Sci.* 22:391–402.
- Grandjean P., M. Horder, Y. Thomassen. 1990. Fluoride, aluminum, and phosphate kinetics in cryolite workers. *J. Occup. Med.*, 32(1):58–63.
- Grandjean P, J. H. Olsen, O. M. Jensen, K. Juel. 1992. Cancer incidence and mortality in workers exposed to fluoride. *J. Natl. Cancer Inst.*, 84(24):1903–1909.
- Gupta, M. K., V. Singh, P. Rajwansi, M. Agarwal, K. Rai, S. Srivastava. 1999. Groundwater quality assessment of Tehsil Kheragarh, Agra (India) with special reference to fluoride. *Environ. Monit. Assess*, 59(3):275–285.
- Haszeldine R. N. and A. G. Sharpe. 1951. *Fluorine and its compounds. Methuen's Monographs on Chemical Subjects*, London, 153 pp.
- Hem, J. D. 1985. *The study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*, 3rd edn. U. S. Geological Survey Water-Supply, paper 2254.
- Herazo, C. B. 1988. *Fluoruros. Ediciones Monserrat LTDA*, Bogotá, 191 pp.
- Hernández-Romano. U. 1995. *Evolución sedimentológica de la secuencia cretácica en el área de Huitziltepec: México. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM.*, 147 pp.
- Hernández-Romano U. 1999. *Facies Stratigraphy and diagenesis of the Cenomanian –Turonian of the Guerrero – Morelos Platform, southern Mexico. PhD. Thesis. Postgraduate Research Institute for Sedimentology. University of Reading, UK.*, 322 pp.
- Hem, J. D. 1985. *The study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*, 3rd edn. U.S. Geological Survey Water-Supply, paper 2254.
- Hileman, B. 1988. Fluoridation of water: questions about health risks and benefits remain after more than 40 years. *Chem. Eng. News*, 1:26–42.
- Hurtado, R. and J. Gardea-Torresdey. 2004. Environmental evaluation of fluoride in drinking water at "Los Altos de Jalisco", in the central Mexico region. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part "A"*. 67:1741-1753.
- Hyndman, D.W. 1985. *Petrology of igneous rocks*, 2nd edn. McGraw-Hill, Inc., New York, 533 pp.

- INEGI. 2005. Anuario Estadístico del Estado de Morelos.
<http://www.inegi.org.mx/est/contenido/espanol/sistemas/ae05/estatal/mor/index.htm>
- INRA, S.A. 1996. Estudio Geohidrológico de la zona Cuautla-Yautepec, Mor. Comisión Nacional del Agua, México D.F.
- Juárez, L., L. Juárez-López, L. Diéguez-Martínez, J. C. Hernández-Guerrero. 2003. Prevalencia de Fluorosis en escolares de Iztapalapa en la Ciudad de México. División de estudios de Posgrado e Investigación; Facultad de Odontología UNAM Mem. Seminario interno de investigación (inédito).
- Keith, L.H. 1992. Environmental sampling and analysis: A practical guide. Lewis Publishers, Chelsea, MI, 143 pp.
- Kim K. and G. Y. Jeong. 2005. Factors influencing natural occurrence of fluorid rich groundwaters: a case study in the southeastern part of the Korean Peninsula. *Chemosphere*, 58:1399–1408.
- Kim, K. and S. T. Yun. 2005. Buffering of sodium concentration by cation exchange in the groundwater system of a sandy aquifer. *Geochem. J.* 39:273–284.
- Lee, J. U., H. T. Chon, Y. W. John. 1997. Geochemical characteristics of deep granitic groundwater in Korea. *J. Kor. Soc. Groundwater Environ.* 4:199–211.
- Li, X.S., J. L. Zhi, R. O. Gao. 1995. Effect of fluoride exposure on intelligence in children. *Fluoride*, 28(4):189–192.
- López-Ramos, J. 1979. Geología de México, Tomo 2: México D.F. 454 pp.
- Loyola-Rodríguez, J.P., A. Pozos-Guillén, A. Rueda-González, S. Vázquez- Moctezuma, G. De la Paz-Domínguez. 1996. Factores de riesgo a fluorosis dental en San Luis Potosí, México. *Rev. ADM.* 6:295-300.
- Loyola-Rodríguez J. P., A. Pozos-Guillén, J. C. Hernández-Guerrero. 1998. Bebidas embotelladas como fuentes adicionales de exposición a flúor. *Salud Publica Mex.* 40:438-441
- Lugo Hupb J. 1988. Elementos de geomorfología aplicada. Métodos cartográficos. UNAM. Instituto de Geografía, México D.F. 128 pp.
- Lugo-Hupb, J. 1990. El Relieve de la República Mexicana. *Revista del Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México* 9(1):82-111.
- Maithani, P. B., R. Gurjar, R. Banerjee, B. K. Balaji, S. Ramachandran, R. Singh. 1998. Anomalous fluoride in groundwater from western part of Sirohi district, Rajasthan and its crippling effect of human health. *Curr. Sci.* 74(9):773–777.
- Malhotra A., A. Tewari, H. S. Chawla, K. Gauba, K. Dhall. 1993. Placental transfer of fluoride in pregnant women consuming optimum fluoride in drinking water. *J. Indian Soc. Pedod. Prev. Dent.*, 11(1):1–3.
- Molina-Garza, R. and A. Ortega-Rivera. 2006. Chronostratigraphy and paleomagnetism of the Balsas Group in the Tuzantlán-Copalillo basin, northern Guerrero state, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2): 224-231.
- Molina N., G. Sánchez, M. E. Irigoyen. 1996. Prevalencia y severidad de fluorosis dental aplicando el índice Thylstrup y Fejerskov (TF). *Tem Selec Invs Clin, II, UAM-X:* 47-58.

- Morán-Zenteno, D. J., M. Cerca, J. Duncan Keppie. 1995. La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana; volumen conmemorativo del centenario grandes fronteras Tectónicas de México. 57(3): 319-341.
- Morán-Zenteno, D. J.; L. A. Alba-Aldave; R. G. Martínez-Serrano; M. A. Reyes-Salas; R. Corona-Esquivel; S. Angeles-García. 1998. Stratigraphy, Geochemistry and Tectonic Significance of the Tertiary Volcanic Sequences of the Taxco-Quetzalapa Region, Southern Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15(2): 167-180.
- Morán-Zenteno, D. J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R. G., Martiny, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G. N., 1999, Tertiary arc magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt. Journal of South American Earth Sciences, 12: 513 – 535.
- Morán-Zenteno, D. J., L. A. Alba-Aldave, J. Solé, A. Iridondo. 2004. A major resurgent caldera in southern Mexico: the source of the late Eocene Tilzapotla ignimbrite. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 136: 97-119.
- Morán-Zenteno, D. J., M. Cerca, J. Duncan Keppie. 2005. La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen conmemorativo del Centenario Grandes Fronteras Tectónicas de México, 57(3):319-341.
- Morris, M. D. 2004. The chemistry of fluorosilicate hydrolysis in municipal water supplies: a review of the literature and a summary of University of Michigan studies, Report to the national academy of science. University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Monter-Ramírez, A., D. J. Morán-Zenteno., L. Alba Aldave, E. Centeno-García. 2004. Revisión de la estratigrafía del Grupo Balsas en el área de Amacuzac, Estados de Morelos y Guerrero (abstract), in IV Reunión Anual de Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Querétaro, México, Libro de Resúmenes, p.126.
- Muñiz Ramírez A. O. 2009. Percepción del estado de la dentición y fluorosis dental en niños de una localidad del este del Estado de Morelos. XVII Encuentro Nacional, VIII Iberoamericano de investigación en Odontología. Facultad de Odontología, UNAM.
- Nordstrom, D.K., E. A. Jenne. 1977. Fluoride solubility in selected geothermal waters. Geochim. Cosmochim Acta 41,175–88.
- Nordstrom, D. K., Ball, J. W., Donahoe, R. J. and D. Whittemore. 1989 Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa. Geochim. Cosmochim. Acta 53, 1727–1740.
- Nixon, G.T. 1982. Relationship between Quaternary volcanism in central México and the seismicity and structure of subducted oceanic lithosphere. Geological Soc. Of Ame. Bull. 93:514-523.
- OMS. 1958. Primer Informe Técnico sobre Fluoruros del Agua de Bebida. Serie de informes técnicos.
- OMS. 1972. Etiología y Prevención de la Caries Dental. Informe de un Grupo de Científicos de la OMS. Organización Mundial de la Salud. Serie de Informes Técnicos No. 494, Ginebra, 21 pp.
- OMS. 1975. Fluoruros y Prevención de la Caries Dental. 28 Asamblea, Ginebra.
- OMS. 1978. Fluoruros y Prevención de la Caries Dental. 31 Asamblea, Ginebra.

- Ontiveros-Tarango, G. 1973. Estudio estratigráfico de la porción noroccidental de la Cuenca Morelos-Guerrero. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. 25:189-234.
- Ortega-Guerrero, M. A. 2009. Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 26(1):143-161.
- Ortega-Gutiérrez, F. 1978a. Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca. *Revista del Instituto de geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2:112-131.
- Ortega-Gutiérrez F., 1980, Rocas volcánicas del Maestrichtiano en el área de San Juan Tetelcingo, estado de Guerrero, en V Convención Geológica Nacional, Libro guía de la excursión geológica a la parte central de la cuenca del alto Río Balsas, estados de Guerrero y Puebla: México, Sociedad Geológica Mexicana, 34-38 pp.
- Ortega-Gutiérrez, F. 1981b. La evolución Tectónica premisisípica del sur de México: revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, v. 5, p. 140-157.
- Ortiz B.M.G. y G.D. Vargas Ovalle. 1996. Fluorosis dental en la población escolar de Salamanca, Guanajuato. *Revista ADM*, 50: 289-294.
- Ozsvath, D. L. 2006. Fluoride concentrations in a crystalline bedrock aquifer, marathon county, wisconsin. *Environ. Geol.*, 50(10):132-138.
- Ozsvath, D. L. 2009. Fluoride and environmental health: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 8:59-79.
- Pascuare, G., L. Vezzoli, A. Zanchi. 1987. Morphological and structural model of Mexican volcanic belt. *Geof. Inter.*, 26:159-176.
- Pérez-Cruz, G.A. 1988. Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México. Tesis de Maestría, Fac. de Ingeniería, UNAM. 83p.
- Pertti L. and B. Backman. 1995. The occurrence and geochemistry of fluorides with special reference to natural waters in Finland. Report of investigation. Geological Survey of Finland. 128 pp.
- Rafique T., S. Naseem, T. H. Usmani, E. Bashir, F. A. Khan, M. I. Bhangar. 2009. Geochemical factors controlling the occurrence of high fluoride groundwater in the Nagar Parkar area, Sindh, Pakistan. *Journal of Hazardous Materials*, 171:424-430.
- Rao, N. C. R. 2003. Fluoride and environment - a review. In: Bunch, M. J. V., M., Suresh, T. V. Kumaran (editores). *Proceedings of third international conference on environment and health*. York University, Chennai, India.
- Raymond, L. A. 2002. *Petrology. The Study of Igneous Sedimentary & Metamorphic Rocks*. Second Edition. Mc Graw Hill, New York, 720 pp.
- Reimann, C. y P. De Caritat, 1998. *Chemical Elements in the Environment Factsheets for the Geochemist and Environment Scientist*. Springer, Berlin, 397 pp.
- Robertson, F. N. 1986. Occurrence and solubility controls of trace elements in groundwater in alluvial basins. *Regional aquifer systems in the US*. *Am. Water Res. Assoc.*, 69-80.

- Romundstad, P., T. Haldorsen, A. Andersen. 2000. Cancer incidence and cause specific mortality among workers in two Norwegian aluminum reduction plants. *Am. L. Industr. Med.*, 37(2):175-183.
- Rose, A. W., H. E. Hawkes, J. S. Webb. 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*, 2nd ed., Academic press, London, 657 pp.
- Rozanski, K., L. Araguas-Araguas, R. Gonfiantini. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Isotopic Record*, ed. P.K. Swart, K. L. Lohwan, J. A. McKenzie, S. Savin. *Am. Geophys. Monogr. Washington, DC., Union*, 78:1-37.
- Russell, A. L., and E. Elvove. 1951. Domestic Water and Dental Caries. VII. A Study of the Fluoride-Dental Caries Relationship in an Adult Population. *Pub. Health Rep.* 66:1389-1401.
- Salinas-Prieto, J. C., O. Monod, M. Faure. 2000. Ductile deformations of opposite vergence in the eastern part of the Guerrero terrane (SW Mexico). *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 389-402.
- Sánchez Montes de Oca, Rafael. 1961. *Estudio Geológico Superficial del Área Correspondiente al Distrito Minero de Huautla, Morelos*. Tesis Profesional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, 36 pp.
- Sutarno, R. y H. F. Steger. 1985. The use of certified reference materials in the verification of analytical data and methods. *Talanta*, v.32, 439-445 p.
- Saxena, V. K. and S. Ahmed. 2001. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. *Environ. Geol.* 40: 1084-1087.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G., Tolson, G., Köhler H., 1995, Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: geochronological evidence: *Tectonics*, 14: 1339-1350
- Secretaría de Salud. 1996. Modificación de Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 18 ene. 1996. México, D.F., 21 pp.
- Sedlock, R. L., F. Ortega-Gutiérrez, R. C. Speed. 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geological Society of America Special Paper* 278, 153 pp.
- Seif, Tomas R. 1997. *Cardiología. Prevención, diagnóstico y tratamiento contemporáneo de la caries dental*. Editorial Actualidades Médico Odontológicas Latinoamericana, C.A. Venezuela 1997. 90 p
- Shen, Z., M. Zhou and M. Tang. 1989. The Characteristics of Fluorine in Groundwater of North China and the significance of Fluorite-Water interaction to Fluorine, transportation. *Water-Rockn Interaction*. Ed. Balkema-Rotterdam, p.p. 801-804.
- Smith, M. C., E. M. Lantz and H. V. Smith. 1931. The cause of mottled enamel. *Science*, 74: 244.
- Smyth Chamosa E., Taracido Trunk M., Gestal Otero J. J. 1992. El flúor en la prevención de la caries dental. *Dias de Santas, Madrid, España*, 112 pp.

- Soyseth V., J. Kongerud, J. Ekstrand, J. Boe. 1994. Relation between exposure to fluoride and bronchial responsiveness in aluminum potroom workers with work-related asthma-like symptoms. *Thorax*, 49:984–989.
- Sreedevi, P. D., S. Ahmed, B. Made, E. Ledoux, J. M. Gandolfi. 2006. Association of hydrological factors in temporal variations of fluoride concentration in a crystalline aquifer in India. *Environ. Geol.* 50: 1–11.
- Takahashi, K. 1998. Fluoride-linked down syndrome births and their estimated occurrence due to water fluoridation. *Fluoride* 31(2):61–73.
- Urbansky, E. T. and M. R. Schock. 2000. Can fluoridation affect lead (II) in potable water? hexafluorosilicate and fluoride equilibria in aqueous solution. *Int. J. Environ. Stud.* 57:597–637.
- Valencia-Díaz S. y Carrasco-Carballido V. 2006. Tendencias en el cambio de uso de suelo para actividades agrícolas en el estado de Morelos. Memorias del XI Congreso Internacional y Nacional de Ciencias Ambientales. Centro de Educación Ambiental e Investigación Sierra de Huautla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Vepraskas, M.J., J.L. Cox, and Students. 2002. Redox Potential Measurements. Depth of the Soil Science, NC State University. USA.
- Verma, S.P. 1987. Mexican Volcanic Belt-present state of knowledge and unsolved problems: *Geof. Inter.* 26:309-340.
- Wang S. X., Z. H. Wang, X. T. Cheng, J. Li, Z. P. Sang, X. D. Zhang. 2007. Arsenic and fluoride exposure in drinking water: children's IQ and growth in Shanyin country, Shanxi province, China. *Environ. Health Perspect*, 115(4):643–647.
- Walton, W. C. 1970. *Groundwater Resources Evaluation*. Mc. Graw-Hill, New York, 664 pp.
- Whiting P., M. MacDonagh, J. Kleijnen. 2001. Association of Down's syndrome and water fluoride level: a systematic review of the evidence. *BMC Public Health*, 1(1):6.
- WHO (World Health Organization). 1994. Fluorides and oral health, World Health Organization Technical Report Series 846, World Health Organization, Geneva.
- WHO. 1999. *Guidelines for drinking-water quality*, vol 2, 2nd edn. World Health Organization, Geneva.
- Zamudio-Angeles, D. e I. Ferrusquía-Villafranca. 1996. Análisis lito y bioestratigráfico del Cretácico en el área de Manyalán-Tulimán, Guerrero nororiental: una contribución al conocimiento geológico de la Sierra Madre del Sur, in XIII Convención Geológica Nacional, Sociedad Geológica Mexicana: La paz, Sociedad Geológica Mexicana.

ANEXOS

ANEXO B

Lámina No.: CUAU- 15	Coordenadas: 504928.0, 2069164.71
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color rosa con tintes de color gris, grano fino, masiva y compacta.	
* Textura: Felsofirica, con fábrica de cristales euhedraes y subhedrales	
Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Andesina) 75%	Anfibol (Hornblenda) 10%
	Apatito 2%
MINERALES SECUNDARIOS: Clorita 8%, Cuarzo 5%	
Características especiales: presenta plagioclasa zoneada	
Clasificación: Andesita de Hornblenda	

Lámina No.: CUAU- 16	513237.19, 2073189.09
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color blanco de grano medio.	
* Textura: Holocristalina	
Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Oligoclasa) 15%	Piroxeno (Augita) 10%
Feldespato 25%	
Cuarzo 50%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales	
Clasificación: Cuarzolatita (Intrusivo)	

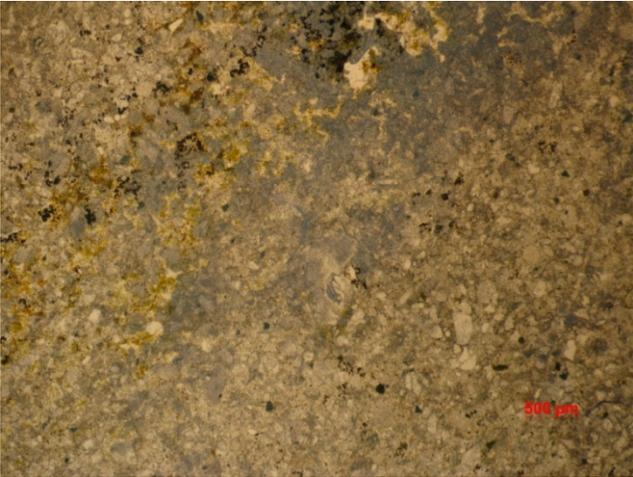
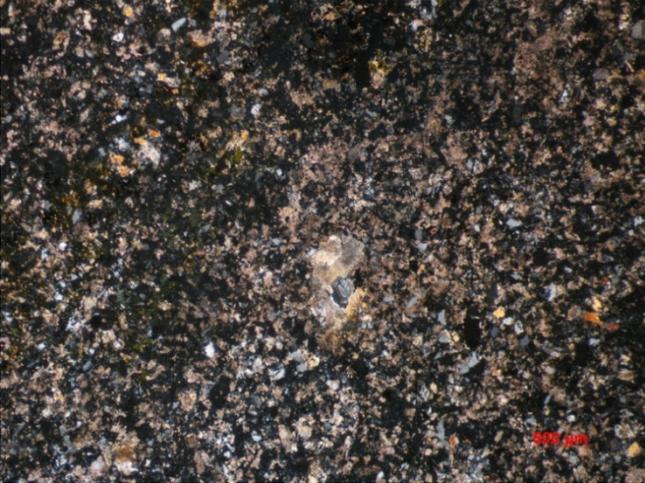
Lámina No.: CUAU - 18	501760.64, 2069315.53
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Roca muy alterada, compacta, gris verdoso de textura afanítica, presenta vesículas rellenas de cuarzo y malaquita	
* Textura: textura holocristalina	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Feldespato (sanidina) 40%	Piroxeno (Augita) 10%
	Minerales Opacos 5%
MINERALES SECUNDARIOS: Óxidos 5%, Clorita 10%, Calcita 25%	
Características especiales: La lámina presenta cloritización y oxidación. El afloramiento presenta hidrotermalismo y cavidades rellenas de cuarzo.	
Clasificación: Traquita	
	

Lámina No.: CUAU-20	500458.67, 2066907.05
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Gris claro de grano fino, con tintes pardos, masiva y compacta	
* Textura: Traquítica, con fábrica de cristales ehedrales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Labradorita) 65%	Piroxeno(Hiperstena) 25%
	Minerales Opacos 5%
MINERALES SECUNDARIOS: óxidos 5%	
Características especiales:	
Clasificación: Basalto de Hiperstena	

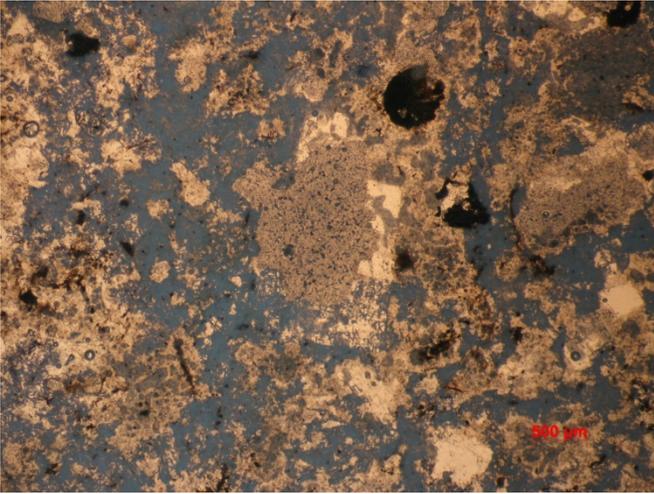
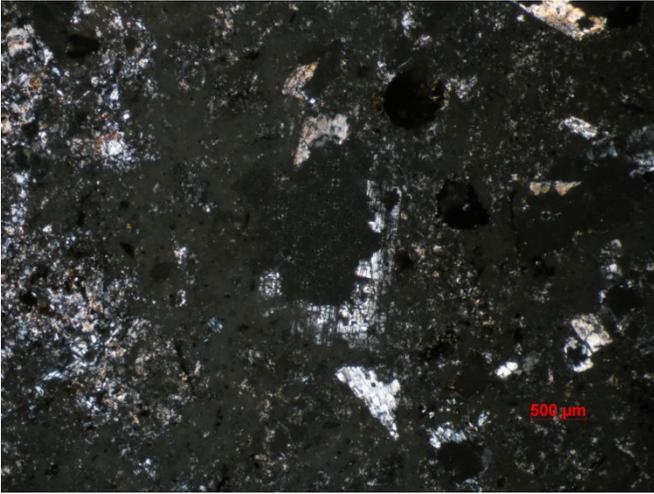
Lámina No.: CUAU - 21	500803.20, 2065689.98
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Textura Porfídica	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Feldespato 8%	Augita 2%
Cuarzo 20%	
Ceniza 40%, Vidrio 30%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: lámina muy gruesa	
Clasificación: Toba cinerítica	
	

Lámina No.: CUAU – 22	499820.66, 2057465.49
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Rosa, porfídica con cristales observables de plagioclasa.	
* Textura: Porfídica piroclástica	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Feldespatos(ortoclasa) 10%	Fragmentos de roca 25%
Andesina 35%	Minerales opacos 5%
Vidrio 5%	Ceniza 15%
MINERALES SECUNDARIOS: Piroxenos alterados 5%	
Características especiales:	
Clasificación: Latita con Xenolitos	

Lámina No.: CUAU – 23	501056.60, 2059781.76
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Textura Porfídica	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Feldespatos (Ortoclasa)35%	Apatito 1%
Plagioclasas (Oligoclasa) 35%	Opacos 5%
Cuarzo 20%	Biotita 2%
MINERALES SECUNDARIOS: Clorita 2%	
Características especiales:	
Clasificación: Cuarzo Latita	

Lámina No.: CUAU - 24	Coordenadas 502058.44, 2061872.86
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Porfídica	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Labradorita 75%)	Piroxeno (augita y enstatita) 20%
	Olivino 5%
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: Plagioclasas zoneadas, matriz arenosa (ceniza)	
Clasificación: Basalto	

Lámina No.:CUAU-28	502324.73, 2054343.62
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color rosa con tintes blancos, de grano medio compacta.	
* Textura: Felsofírica con cristales subhedrales y ehedrales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Andesina) 85%	Anfíbol(Hornblenda) 10%
MINERALES SECUNDARIOS: Clorita y calcita 5%	
Características especiales: Presenta plagioclasas zoneadas y matriz vítrea.	
Clasificación: Andesita de Hornblenda	

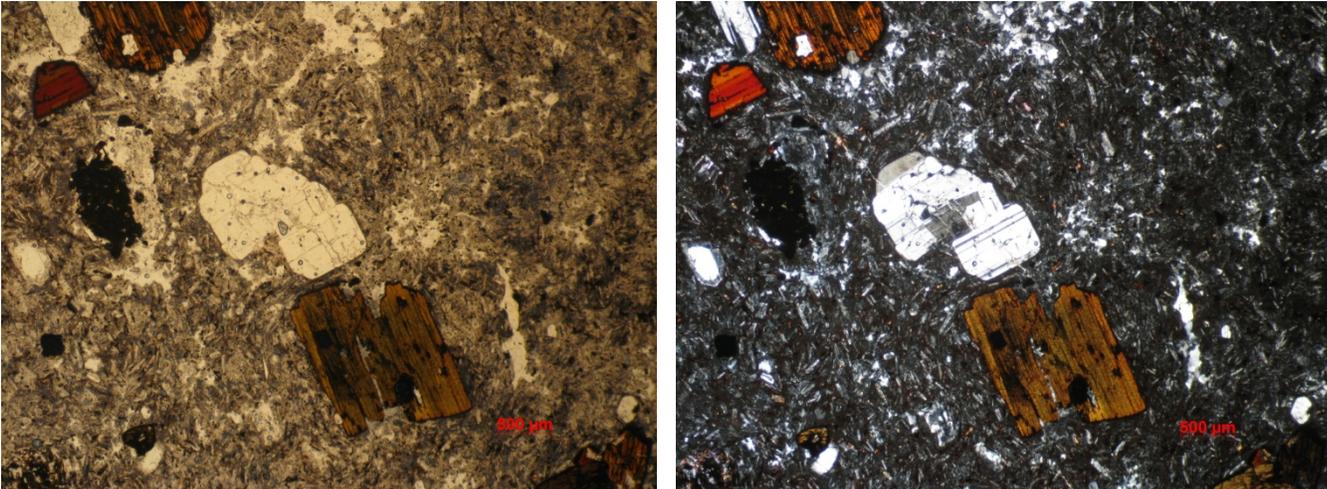
Lámina No.: CUAU - 31	506602.49, 2061560.45
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Porfídica con Fenocristales (Euedrales)	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasas (Andesina, Oligoclasa) 85%	Hornblenda 5%
	Hiperstena 5%
MINERALES SECUNDARIOS: Clorita 2%	Apatito 3%
Características especiales: minerales alterados, algunas biotitas se encuentran cloritizadas.	
Clasificación: Andesita	
	

Lámina No.: CUAU – 32	Coordenadas: 514268.42, 2056984.04
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: microlítica-traquítica	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Andesina 90%	Anfíbol (Hornblenda) 10%
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales:	
Clasificación: Andesita	

Lámina No.: CUAU- 33	Coordenadas: 512197.36, 2059352.24
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color rosa con tintes grises, de grano medio, compacta y masiva.	
* Textura: Inequigranular, con fábrica de cristales subhedrales y anhedrales.	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Oligoclasa) 50%	Anfíbol (Hornblenda) 10%
Feldespato (Ortoclasa) 25%	
Cuarzo 15%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: Presenta plagioclasas zoneadas y oxihornbledas.	
Clasificación: Cuarzo Latita	

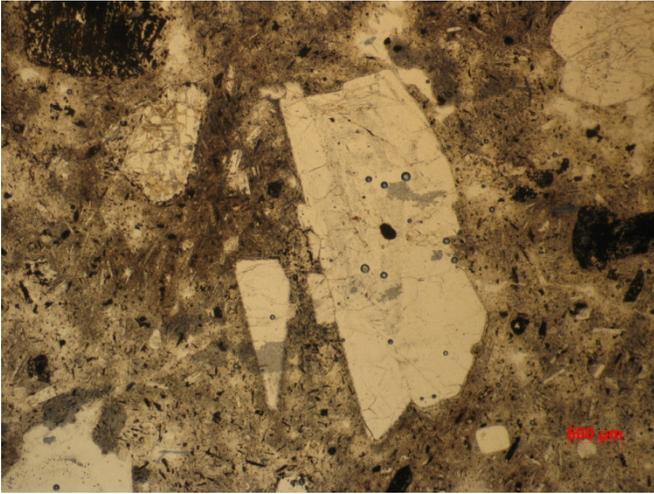
Lámina No.: CUAU- 34	Coordenadas: 513240.51, 2060951.75
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color rosa claro de grano medio	
* Textura: Glomeroporfídica, con fabrica de cristales subhedrales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasas (Andesina) 60%	Anfibol (Hornblenda) 20%
Fragmentos de roca 20%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: Presenta microlitos opacos y plagioclasazoneada.	
Clasificación: Toba lítica andesítica	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	

Lámina No.: CUAU- 36	Coordenadas: 510865.70, 2063815.91
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Porfídica, color negro, cristales visibles de plagioclasas.	
* Textura: porfídica-	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES:	MINERALES ACCESORIOS:
Labradorita 80%	Augita 10%
	Olivino 5%
MINERALES SECUNDARIOS: Opacos 5%	
Características especiales:	
Clasificación: Basalto	

Lámina No.: CUAU- 37	Coordenadas: 511441.73, 2063835.00
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Gris claro, compacta, masiva.	
* Textura: Glomeroporfídica, con cristales euhedrales y subhedrales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Andesina) 75%	Piroxeno (Augita) 20%
MINERALES SECUNDARIOS: Calcita 5%	
Características especiales:	
Clasificación: Andesita	

Lámina No.: CUAU - 38	501107.42 2065985.09
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color gris claro con tintes pardo, de grano fino.	
* Textura: Hialpilitica con fábrica de cristales euhedrales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Labradorita) 60%	Biotita 20%
MINERALES SECUNDARIOS: clorita 5% y ceniza 15%	
Características especiales:	
Clasificación: Basalto de Biotita	

Lámina No.: CUAU - 41	Coordenadas: 503927.92, 2065791.83
-----------------------	---------------------------------------

DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color rosa, arenosa, muy intemperizada

* **Textura:** Porfídica

* **Mineralogía (en porcentajes aproximados):**

MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
---------------------------	---------------------------

Cuarzo 5%,	
------------	--

Plagioclasas (andesina) 35%	
-----------------------------	--

Feldespato (ortoclasa) 35% , Vidrio20%	
--	--

MINERALES SECUNDARIOS: Óxidos 5%

Características especiales:

Clasificación: Latita

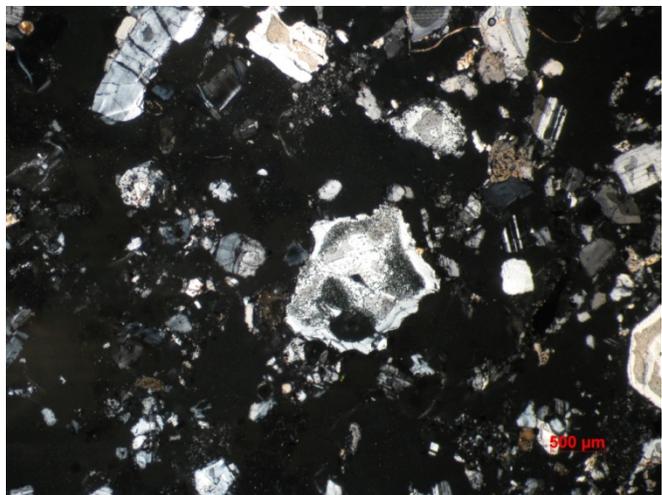
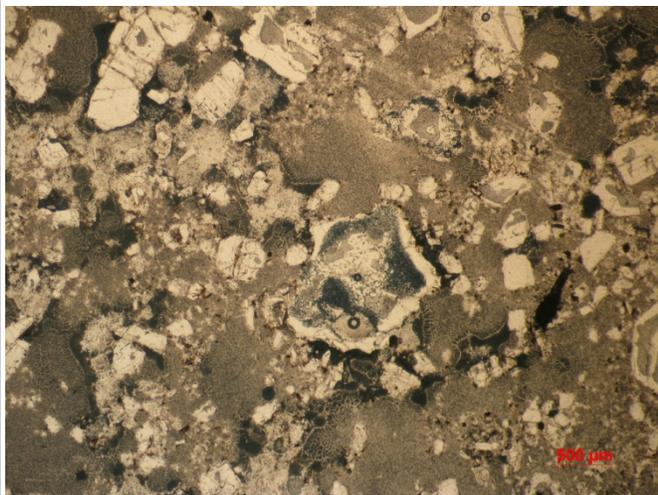


Lámina No.: CUAU – 42	Coordenadas: 513108.43, 2066483.86
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color gris de grano fino.	
* Textura: Inequigranular glomeroporfídica, con fábrica de cristales subhedrales y anhedrales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasas (Labradorita) 80%	Biotita 10%
	Piroxeno (Augita) 10%
MINERALES SECUNDARIOS:.	
Características especiales: Presenta plagioclasas zoneadas y minerales opacos	
Clasificación: Basalto	

Lámina No.: CUAU- 45	Coordenadas: 501427.21, 2063244.69
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Color rosa claro con tintes color gris, de grano fino, masiva y compacta	
* Textura: Porfídica con fábrica de cristales subhedrales.	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa (Oligoclasa) 60%	Biotita 15%
Cuarzo 25%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: Minerales opacos	
Clasificación: Dacita de Biotita	

Lámina No.: CUAU - 47	Coordenadas: 503664.94, 2062470.58
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Roca compacta color gris oscuro de textura porfídica.	
* Textura: Traquitoide fluidal con fenocristales	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasas (Andesina, Oligoclasa) 80%	Piroxeno (Augita-Egirina) 10%
MINERALES SECUNDARIOS: Clorita 10%	
Características especiales: Muestra cloritizada, con oxidación, cristales que presentan alteración.	
Clasificación: Andesita	

Lámina No.: CUAU - 49	Coordenadas: 503647.20, 2063158.45
-----------------------	---------------------------------------

DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:

* **Textura:** Porfídica

* **Mineralogía (en porcentajes aproximados):**

MINERALES ESENCIALES: [%]

MINERALES ACCESORIOS: [%]

Plagioclasas (Andesina, Oligoclasa) 80%

Ensastita 10%

Augita 10%

MINERALES SECUNDARIOS:

Características especiales:

Clasificación: Andesita



Lámina No.: CUAU - 49-A	Coordenadas: 503647.20, 2063158.45
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Fenocristales en matriz de microlitos, porfídica-felsofírica	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Andesina 50%	Augita 10%
Matriz de vidrio 30%	Enstatita 10%
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: Piroxenos muy oxidados, fragmentos de roca	
Clasificación: Andesita	

Lámina No.: CUAU - 50	Coordenadas: 508298.65, 2061846.91
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Hipocristalina(subedrales)	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasa: (Andesina) 60%	Piroxeno (Augita) 5%
Matriz vítrea 30%	
MINERALES SECUNDARIOS: Calcita 5%	
Características especiales:	
Clasificación: Andesita	

Lámina No.: CUAU - 51	Coordenadas: 508542.53, 2062933.21
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Roca color rosado oscuro de matriz de grano fino con algunos fenocristales	
* Textura: Porfídica traquitoide	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Plagioclasas (Andesina) 75%	Augita 15%
	Apatito 1%
MINERALES SECUNDARIOS: Clorita 5%, Calcita 5%	
Características especiales: Minerales Oxidados	
Clasificación: Andesita	

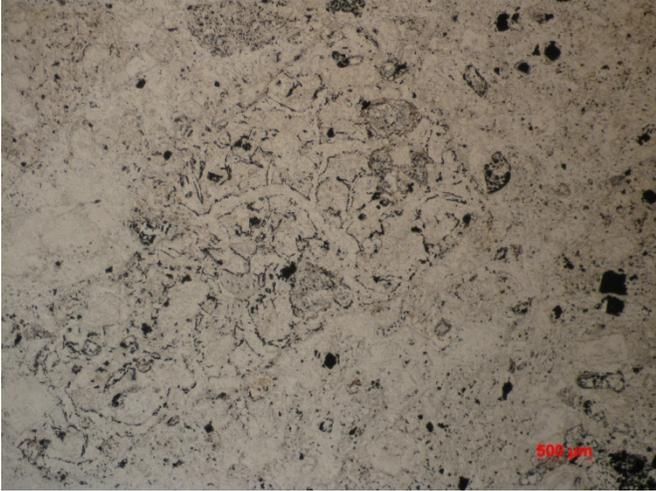
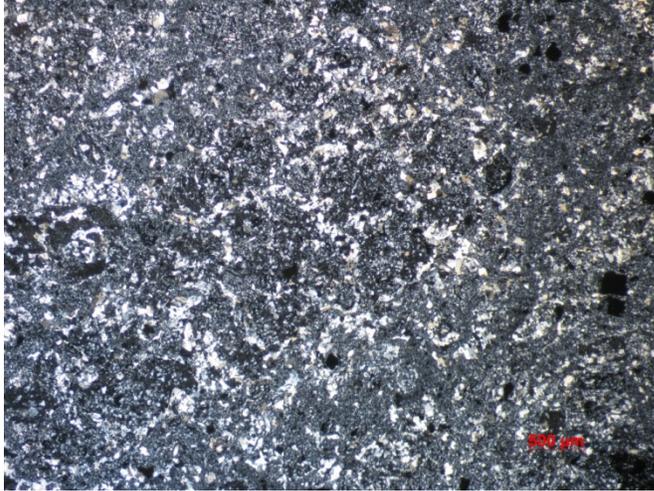
Lámina No.: CUAU - 52 A	Coordenadas: 512168.24, 2063630.38
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: Equigranular fina afanítica/alotriomórfica (cristales anhedrales)	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Cuarzo 40%	Minerales opacos 5%
Plagioclasas (Oligoclasa) 5%	
Vidrio 50%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales:	
Clasificación: Dacita	
	

Lámina No.: CUAU - 55	Coordenadas: 512713.35, 2068486.25
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO: Compacta, masiva, color blanco.	
* Textura: Granular	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Cuarzo 20%	
Calcita 80%	
MINERALES SECUNDARIOS:	
Características especiales: Podría tratarse de parte de una aureola de metamorfismo	
Clasificación: Skarn	

Lámina No.: CUAU - 56	Coordenadas: 512299.09, 2070564.21
-----------------------	---------------------------------------

DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:

* **Textura:** Equigranular de grano fino

* **Mineralogía (en porcentajes aproximados):**

MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
---------------------------	---------------------------

Calcita 86%	Cuarzo 2%
-------------	-----------

Lodo calcáreo 10%	Feldespatos 2%
-------------------	----------------

--	--

MINERALES SECUNDARIOS:

Características especiales:

Clasificación: Caliza (Grainstone)

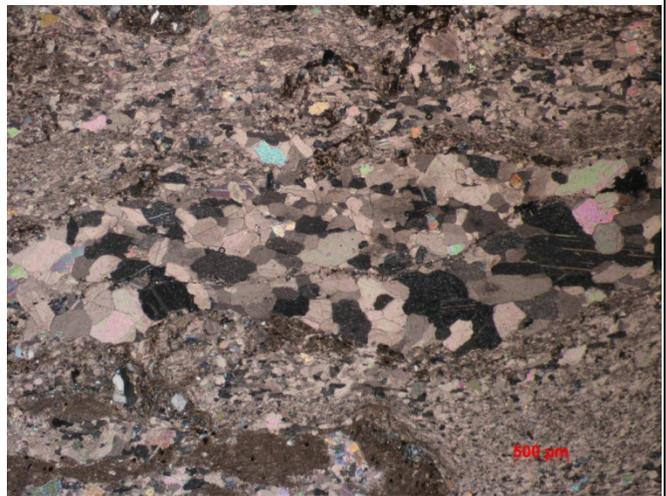
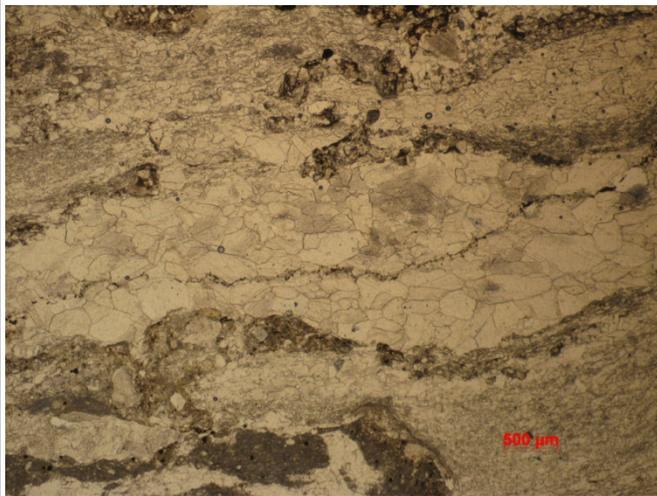
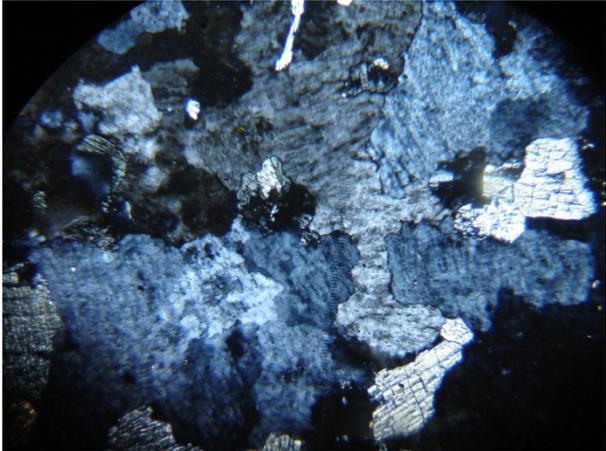


Lámina No.: CUAU - 58	Coordenadas: 514210.42, 2066311.23
DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO:	
* Textura: porfídica pertítica (intercrecimiento de feldespato potásico y sódico)	
* Mineralogía (en porcentajes aproximados):	
MINERALES ESENCIALES: [%]	MINERALES ACCESORIOS: [%]
Cuarzo 10%	Augita 20%
Ortoclasa 40%	
Plagioclasa (oligoclasa) 20%	
MINERALES SECUNDARIOS: clorita 5%, calcita 5%	
Características especiales:	
Clasificación: Cuarzo Sienita	
	

ANEXO C

Material para toma de muestras de agua para análisis

El material y equipo utilizado para el muestreo se preparo con anticipación y consistió en:

- ♦ Guantes de plástico
- ♦ Botellas de polipropileno de diferentes capacidades con tapa y contra tapa.
- ♦ Recipiente de vidrio, o cubeta
- ♦ Etiquetas
- ♦ Marcadores indelebles
- ♦ Masking tape
- ♦ Mapas de la zona
- ♦ Mangueras para conexión a válvula de pozos
- ♦ Tubo de PVC.
- ♦ Soporte con pinzas para bureta
- ♦ Cinta métrica

Equipo

- ♦ Conductivímetro
- ♦ Potenciómetro con capacidad de leer pH, potencial redox (Eh) y temperatura
- ♦ Bureta de 25ml
- ♦ Probetas de 50ml
- ♦ Vasos de precipitado de 50ml
- ♦ Pipeta de 10ml
- ♦ Goteros
- ♦ Piceta
- ♦ Termómetro de -10 a 110°C
- ♦ Cronómetro
- ♦ Porta filtro
- ♦ Jeringas

- ♦ Filtros de acetato de celulosa de 25mm x 0.45µmicrones
- ♦ Celda de asilamiento
- ♦ Sonda para medir nivel del agua subterránea
- ♦ GPS
- ♦ Cámara fotográfica

Reactivos

- ♦ HCl a 0.01 normal
- ♦ Anaranjado de metilo
- ♦ Fenolftaleína
- ♦ pH Buffers 4,7,10
- ♦ Ácido nítrico (HNO_3) ultrapuro
- ♦ Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

ANEXO D

PRUEBAS DE BOMBEO

POZO TENEXTEPANGO

Fórmulas

$$T=K*b$$

$$T= (0.183 Q)/(Ds)$$

$$K= T/b$$

$$S=(2.25T*t_0)/(r^2)$$

Cálculos

$$\Delta s= 14.70 \quad m$$

$$Q= 16 \text{ l/s} \quad 0.016 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T= 0.000199184 \text{ m}^2/\text{s}$$

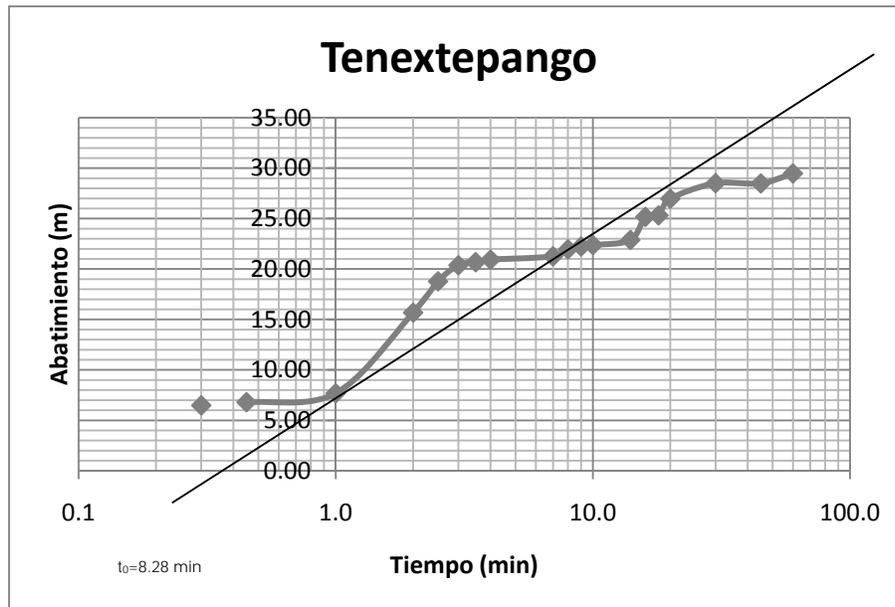
$$K= 1.99184\text{E-}06 \text{ m/s}$$

$$b= 100 \quad m$$

$$t_0= 16.8 \quad s$$

$$r^2= 1$$

$$S= 0.007529143 \text{ m}$$

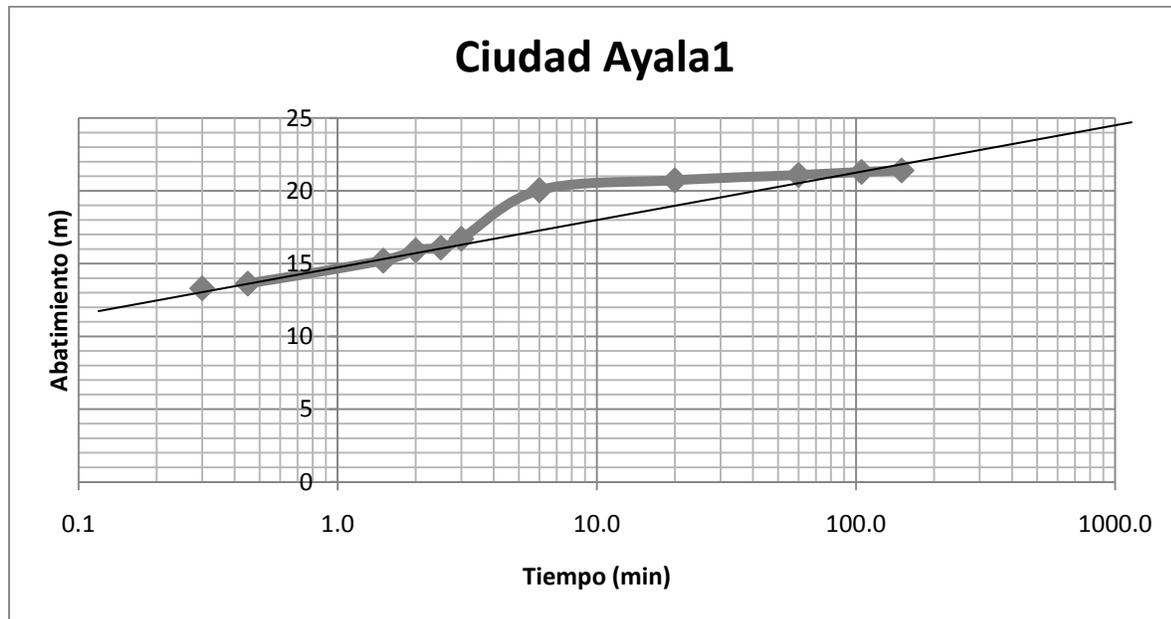


POZO CIUDAD AYALA 1

Tiempo (min)	Abatimiento (m)
0.0	12.48
0.30	13.3
0.45	13.63
1.50	15.21
2.0	15.92
2.5	16.1
3.0	16.71
6.0	20.05
20.0	20.73
60.0	21.09
105.0	21.3
150.0	21.4

Cálculos

$\Delta s = 1.25$ m
 $Q = 36$ l/s 0.036 m³/s
 $T = 0.0052704$ m²/s
 $b = 147$ m
 $K = 3.58531E-05$ m/s

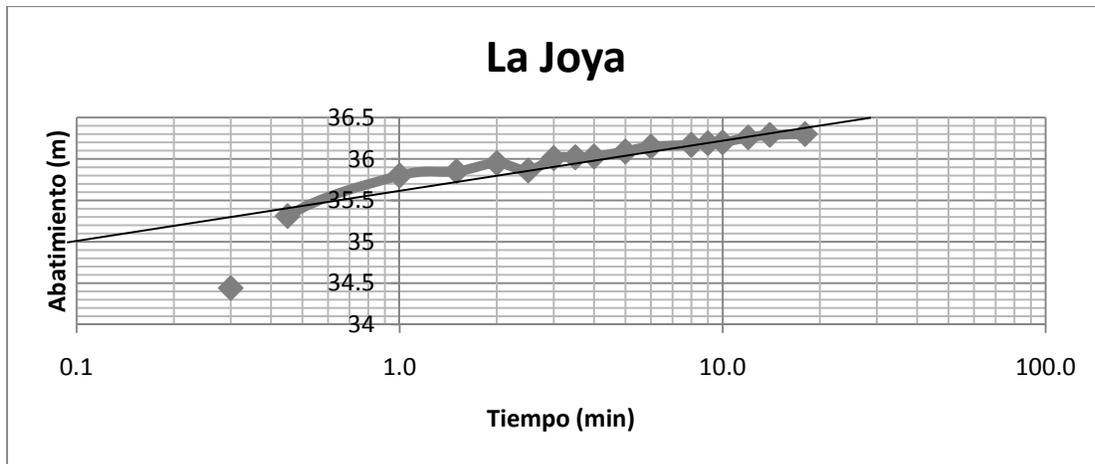


POZO LA JOYA

Tiempo (min)	Abatimiento (m)
0.0	30.36
0.3	34.44
0.45	35.31
1.0	35.8
1.5	35.85
2.0	35.95
2.5	35.86
3.0	36.01
3.5	36.02
4.0	36.03
5.0	36.09
6.0	36.15
8.0	36.17
9.0	36.19
10.0	36.2
12.0	36.26
14.0	36.29
18.0	36.3

Cálculos

$\Delta s = 0.4$ m
 $Q = 16$ l/s 0.016 m³/s
 $T = 0.00732$ m²/s
 $b = 140$ m
 $K = 5.22857E-05$ m/s



POZO EL SALITRE

Tiempo (min)	Abatimiento (m)
1.0	7.44
1.5	8.83
2.0	10.885
2.5	11.83
3.0	11.94
3.5	11.98
4.5	11.995
5.0	11.55
7.0	11.96
9.0	12.96
10.0	13.16
14.0	13.925
16.0	15.07
18.0	14.77
20.0	14.8
30.0	15.88
45.0	15.9
60.0	16.575

Cálculos

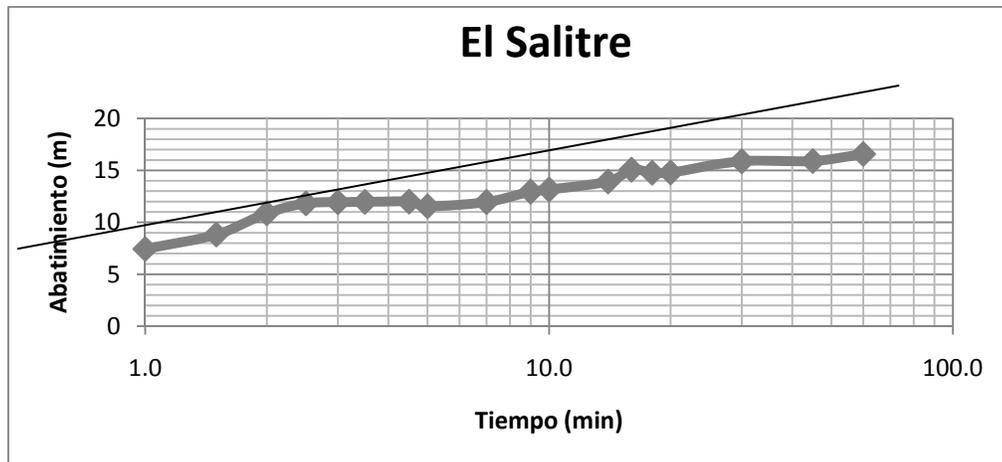
$\Delta s = 5.72$ m

$Q = 9$ l/s 0.009 m³/s

$T = 0.000287937$ m²/s

$b = 100$ m

$K = 2.87937E-06$ m/s



POZO PASESO DE AYALA

Tiempo (min)	Abatimiento (m)
0.0	9.00
0.30	10.39
0.45	10.43
1.3	10.44
1.5	11.22
2.0	11.63
3.48	29.68
4.5	30.09
5.0	30.29
5.5	30.50
6.0	30.58
7.0	30.84
8.0	31.11
9.0	31.28
10.0	31.46
12.0	31.74
14.0	31.99
16.0	32.21
18.0	32.43
20.0	32.63
25.0	33.10
30.0	33.38
45.0	34.06
60.0	34.56

Cálculos

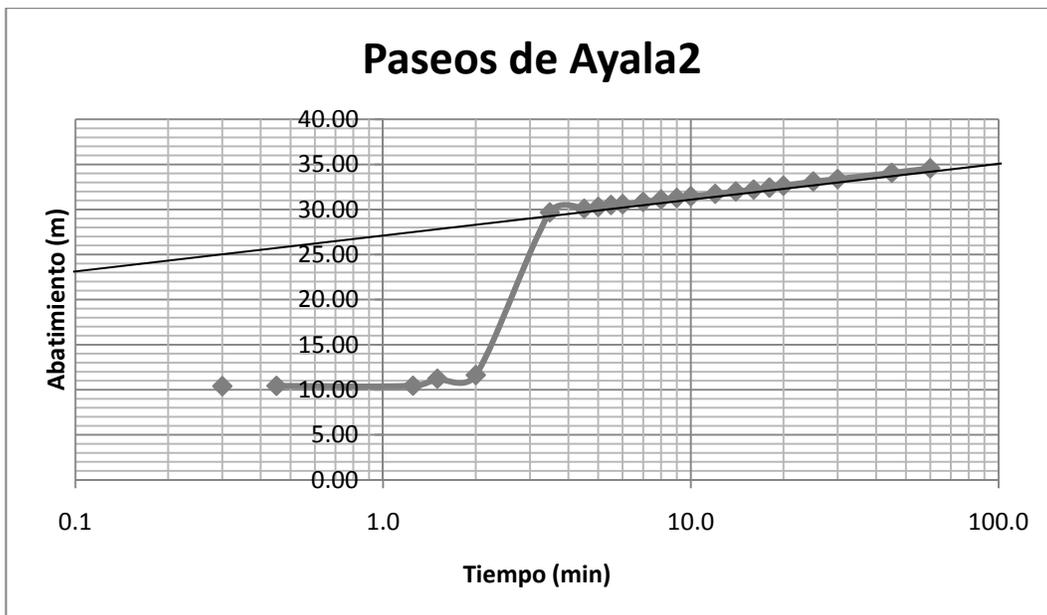
$\Delta s = 21.02 \text{ m}$

$Q = 16 \text{ l/s} \quad 0.016 \text{ m}^3/\text{s}$

$T = 0.000139296 \text{ m}^2/\text{s}$

$b = 100 \text{ m}$

$K = 1.39296\text{E-}06 \text{ m/s}$



POZO SAN JUAN AHUEHUEYO

Tiempo (min)	Abatimiento (m)
2.5	4.06
3.0	4.16
3.5	4.35
4.0	4.45
4.5	4.56
5.0	4.67
5.5	4.77
6.0	4.86
7.0	4.95
8.0	5.00
9.0	5.06
10.0	5.11
12.0	5.13
14.0	5.15
16.0	5.17
18.0	5.25
20.0	5.29
25.0	5.33
30.0	5.38
60.0	12.56

Cálculos

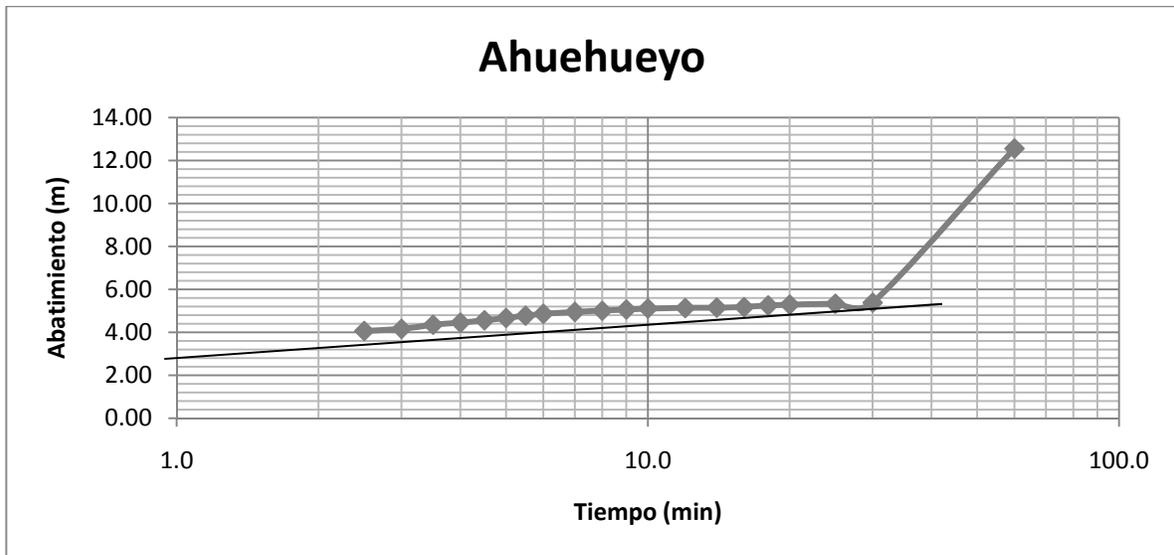
$\Delta s = 7.5$ m

$Q = 36$ l/s 0.036 m³/s

$T = 0.000884295$ m²/s

$b = 100$ m

$K = 8.84295E-06$ m/s



ANEXO E

TABLAS DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO INTERACCIÓN AGUA-ROCA

Tabla E1. Resultados de cationes para las muestras trituradas a sedimentos tamaño arcilla en *agua de lluvia*.

No	Muestra	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	P mg/L	F- mg/L
3	Caliza	0.00009	0.00002	0.00008	0.00006	0.00005	0.00002
9	Toba cinerítica	0.00003	0.00001	0.00039	0.00008	0.00004	0.00006
12	Pedernal	0.00008	0.00001	0.00021	0.00002	0.00005	0.00002
13	Caliza con pedernal	0.00011	0.00003	0.00015	0.00000	0.00005	0.00004
16	Skarn	0.00076	0.00000	0.00026	0.00010	0.00008	0.00002
19	Andesita	0.00004	0.00001	0.00020	0.00006	0.00003	0.00002
21	Toba Cristalina	0.00002	0.00001	0.00023	0.00013	0.00002	0.00003
23	Pórfido Diorítico	0.00004	0.00003	0.00050	0.00006	0.00002	0.00005
31	Cuarzo latita	0.00006	0.00003	0.00011	0.00004	0.00004	0.00002
41	Andesita	0.00002	0.00001	0.00037	0.00007	0.00003	0.00005
43	Andesita	0.00006	0.00002	0.00022	0.00005	0.00004	0.00003
56	Caliza	0.00006	0.00001	0.00004	0.00005	0.00003	0.00000

Tabla E2. Resultados de cationes para las muestras trituradas a sedimentos tamaño arcilla en *agua destilada*.

No.	Muestra	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	P mg/L	F- mg/L
3	Caliza	0.00004	0.00001	0.00021	0.00003	0.00004	0.00002
9	Toba	0.00005	0.00002	0.00009	0.00005	0.00003	0.00003
12	Pedernal	0.00011	0.00002	0.00016	0.00001	0.00005	0.00001
13	Caliza con pedernal	0.00008	0.00003	0.00022	0.00000	0.00005	0.00004
16	Skarn	0.00028	0.00000	0.00016	0.00001	0.00007	0.00001
19	Andesita	0.00002	0.00001	0.00024	0.00006	0.00006	0.00003
21	Toba cristalina	0.00002	0.00000	0.00020	0.00012	0.00003	0.00004
23	Pórfido Diorítico	0.00002	0.00001	0.00022	0.00005	0.00001	0.00002
31	Cuarzo latita	0.00009	0.00002	0.00025	0.00004	0.00002	0.00002
41	Andesita	0.00001	0.00001	0.00037	0.00011	0.00003	0.00005
43	Andesita	0.00012	0.00005	0.00009	0.00005	0.00002	0.00001
56	Caliza	0.00003	0.00000	0.00023	0.00002	0.00004	0.00001

Tabla E3. Resultados de aniones para las muestras trituradas a sedimentos tamaño arcilla en *agua de lluvia*.

No.	Muestra	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
3	Caliza	0.000851	0.000012	0.000014
12	Pedernal	0.000698	0.000003	0.000014
13	Caliza con pedernal	0.000504	0.000033	0.000035
16	Skarn	0.000093	0.000220	0.000133
19	Andesita	0.001109	0.000005	0.000016
21	Toba cristalina	0.001499	0.000013	0.000032
31	Cuarzo latita	0.000849	0.000012	0.000030
41	Andesita	0.000038	0.000004	0.000009
43	Andesita	0.000381	0.000001	0.000003
56	Caliza	0.000804	0.000027	0.000014

Tabla E4. Resultados de aniones para las muestras trituradas a sedimentos tamaño arcilla puestos en *agua destilad*.

No de muestra	Muestra	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
3	Caliza	0.000415	0.000007	0.000010
9	Toba	0.000691	0.000028	0.000012
12	Pedernal	0.000815	0.000095	0.000096
13	Caliza con pedernal	0.000681	0.000034	0.000000
16	Skarn	0.000134	0.000112	0.000014
19	Andesita	0.001082	0.000018	0.000024
21	Toba cristalina	0.001542	0.000025	0.000019
23	Pórfido Diorítico	0.000932	0.000015	0.000004
41	Andesita	0.001329	0.000076	0.000154
43	Andesita	0.001319	0.000013	0.000009
56	Caliza	0.000583	0.000020	0.000002

Tabla E5. Resultados de cationes de las muestras trituradas a sedimentos tamaño grava en *agua de lluvia*.

No.	Muestra	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Fe mg/L	P mg/L	F- mg/L
3	Caliza	0.00011	0.000003	0.00013	0.00001	0.0005	0.000001	0.000000
9	Toba	0.00006	0.000008	0.00027	0.00002	0.00074	0.000001	0.000002
12	Pedernal	0.00008	0.000002	0.00000	0.00000	0.00058	0.000001	0.000002
13	Caliza con pedernal	0.00006	0.000000	0.00006	0.00000	0.00064	0.000001	0.000008
16	Skarn	0.00021	0.000001	0.00006	0.00005	0.00064	0.000001	0.000006
19	Andesita	0.00001	0.000001	0.00010	0.00001	0.00066	0.000001	0.000004
21	Toba cristalina	0.00001	0.000000	0.00022	0.00000	0.00063	0.000001	0.000001
23	Pórfido Diorítico	0.00000	0.000001	0.00014	0.00001	0.00066	0.000001	0.000002
31	Cuarzo Latita	0.00005	0.000013	0.00009	0.00002	0.00069	0.000001	0.000002
41	Andesita	0.00001	0.000000	0.00003	0.00000	0.00065	0.000001	0.000002
43	Andesita	0.00010	0.000012	0.00026	0.00004	0.00066	0.000001	0.000002
56	Caliza	0.00009	0.000000	0.00008	0.00000	0.00062	0.000001	0.000001

Tabla E6. Resultados de cationes de las muestras trituradas a sedimentos tamaño grava en *agua destilada*.

No.	Muestra	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Fe mg/L	P mg/L	F- mg/L
3	Caliza	0.000109	0.000002	0.000027	0.000008	0.000450	0.000026	0.000000
9	Toba Cinerítica	0.000035	0.000005	0.000147	0.000028	0.000630	0.000032	0.000001
12	Pedernal	0.000063	0.000000	0.000059	0.000004	0.000660	0.000066	0.000004
13	Caliza con pedernal	0.000014	0.000001	0.000050	0.000002	0.000630	0.000029	0.000002
16	Skarn	0.000161	0.000000	0.000204	0.000012	0.000640	0.000056	0.000002
19	Andesita	0.000003	0.000000	0.000153	0.000008	0.000700	0.000033	0.000001
21	Toba cristalina	0.000001	0.000000	0.000035	0.000003	0.000680	0.000032	0.000014
23	Pórfido Diorítico	0.000003	0.000002	0.000026	0.000005	0.000720	0.000036	0.000002
31	Cuarzo Latita	0.000059	0.000013	0.000281	0.000015	0.000700	0.000040	0.000002
41	Andesita	0.000002	0.000000	0.000103	0.000003	0.000990	0.000034	0.000002
43	Andesita	0.000204	0.000032	0.000000	0.000044	0.000590	0.000039	0.000002
56	Caliza	0.000083	0.000000	0.000103	0.000003	0.000660	0.000027	0.000001

Tabla E7. Resultados de aniones para las muestras trituradas a sedimentos tamaño grava en *agua de lluvia*.

No.	Muestra	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
3	Caliza	0.000559	0.000158	0.000015
9	Toba	0.000339	0.000050	0.000010
12	Pedernal	0.000364	0.000124	0.000013
13	Caliza con pedernal	0.000114	0.000003	0.000013
16	Skarn	0.000418	0.000475	0.000003
19	Andesita	0.000172	0.000046	0.000015
21	Toba cristalina	0.000947	0.000113	0.000008
23	Pórfido Diorítico	0.000156	0.000023	0.000016
31	Cuarzo Latita	0.000105	0.000132	0.000009
41	Andesita	0.000210	0.000003	0.000010
43	Andesita	0.000886	0.000790	0.000086
56	Caliza	0.000516	0.000000	0.000015

Tabla E8. Resultados de aniones para las muestras trituradas a sedimentos tamaño grava en *agua destilada*.

No.	Muestra	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
3	Caliza	0.000492	0.001229	0.000089
9	Toba	0.000356	0.000084	0.000019
12	Pedernal	0.000654	0.000094	0.000018
13	Caliza con pedernal	0.000171	0.000011	0.000033
16	Skarn	0.000516	0.000076	0.000009
19	Andesita	0.000124	0.000002	0.000010
21	Toba cristalina	0.001937	0.000747	0.000126
23	Pórfido Diorítico	0.000197	0.000034	0.000013
31	Cuarzo Latita	0.000042	0.000148	0.000015
41	Andesita	0.001344	0.000040	0.000029
43	Andesita	0.001404	0.000183	0.000010
56	Caliza	0.000222	0.000000	0.000018