

01123
4



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EL SOPORTE DE LA GEOLOGÍA
ESTRUCTURAL EN EL ESTUDIO DE LA
CONTINUIDAD HIDRÁULICA EN
MEDIOS FRACTURADOS ENTRE LAS
CUENCAS DE SAN JUAN DEL RÍO,
QUERÉTARO Y LOS APASEOS.**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEÓLOGO
P R E S E N T A:
PEDRO RUBÉN MIRELES CALIXTO**

DIRECTOR: ING. HÉCTOR LUIS MACÍAS GONZÁLEZ.

ENERO

2003



A

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1429

SR. PEDRO RUBÉN MIRELES CALIXTO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Héctor Luis Macías González y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**EL SOPORTE DE LA GEOLOGÍA ESTRUCTURAL EN EL ESTUDIO DE LA
CONTINUIDAD HIDRÁULICA EN MEDIOS FRACTURADOS ENTRE LAS CUENCAS DE
SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO Y LOS APASEOS**

- I GENERALIDADES
- II GEOLOGÍA
- III GEOLOGÍA ESTRUCTURAL
- IV GEOHIDROLOGÍA
- V MODELO CUENCA UNIDAD
CONCLUSIONES
REFERENCIAS

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio soci. durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 15 de noviembre de 2002
EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

P

B

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mi madre por apoyarme y confiar en mí en todo momento, gracias a sus sabios consejos logre salir adelante ante las adversidades y luchar por lo que se desea.

Ala memoria de mi padre Antonio Mireles Manjarrez (†) que aunque conviví poco tiempo con él me enseñó los valores de la vida, mismos que he tratado de seguir.

A mis hermanos por brindarme su apoyo cuando más lo necesite, muy particularmente a Marco Antonio y Catalina ya que sin su ayuda y consejos hubiera sido imposible terminar la carrera.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente al Ing. Héctor L. Macías González por su valiosa asesoría y apoyo para la realización de este trabajo.

A los Ingenieros Emiliano Campos Madrigal, Javier Arellano Gil, Alberto Arias Paz y Martín C. Vidal García gracias por sus comentarios y sugerencias que mejoraron y enriquecieron el contenido de este trabajo.

A mis compañeros y amigos tanto de la Facultad como fuera de ella, a todos a aquellos que compartieron alguna clase conmigo y que hicieron de las practicas momentos inolvidables.

Bernardo, Toño, Alberto, Blanca, Mauricio, Horacio, Guillermo, Gustavo Alfonso, Licelda, Myriam, Rosalía y en general a todos gracias por brindarme su amistad, muy especialmente a Sonia por compartir conmigo los últimos semestres y que hiciste de ellos los mejores momentos de la carrera.

Resumen

En el Oligoceno se inicia la acción de esfuerzos distensivos, que dieron lugar a la formación del sistema de fallas normales regionales denominado San Miguel de Allende-Taxco orientadas NW-SE, propiciando la formación de fosas y pilares, que posteriormente durante el Plioceno-Pleistoceno fueron rellenadas con material vulcanoclástico. En el Pleistoceno actúan esfuerzos que causan extensión con orientación N-S los cuales dan origen al sistema de fallas Chapala-Tula con orientación ENE-WSW; este sistema propicia la conexión las cuencas San Juan del Río, Querétaro y Los Apaseos.

Las características litológicas vulcanoclásticas y el arreglo estructural de fallas regionales que se cortan casi perpendicularmente en el área de estudio, permiten la existencia de continuidad hidráulica e integrarlas al modelo de Cuenca Unidad que propone József Tóth (1995). “Un cuerpo rocoso se considera continuo Hidráulicamente a una cierta escala de tiempo, si un cambio de presión en cualquiera de sus puntos puede producir un cambio en cualquier otro punto, en un intervalo de tiempo que se pueda medir a una escala de tiempo específica” Este modelo incluye flujos de tipo intermedio y regional que descienden y circulan a través de material granular y rocas volcánicas fracturadas.

Este flujo se infiltra en el borde Orográfico Caldera de Amcalco-Huichapan (Macías, 2002), y en la zona de Riego No. 23 por lo que la cuenca de San Juan del Río se tomo como la zona de recarga de la Cuenca Unidad, la cuenca de Querétaro, el nivel piezométrico del agua se mantiene a una misma profundidad a lo largo del valle, esto la ubica como la zona de transición. La cuenca de los Apaseos con niveles piezométricos cercanos a la superficie y la descarga de manantiales con temperaturas superiores a los 60° son característicos de la zona de descarga de la Cuenca Unidad.

Capítulo I Generalidades

	Página
I Introducción	1
I.2 Objetivo	3
I.3 Marco Físico	3
I.4 Vías de Comunicación	3
I.5 Clima	5

Capítulo II Geología

II. Marco Geológico Regional	7
II.1 Provincias Fisiográficas	7
II.2 Estratigrafía	8
II.2.1 Calizas y Lutitas	8
II.2.2 Andesitas	9
II.2.3 Ignimbritas	13
II.2.4 Basalto Lajeado	14
II.2.5 Depósitos Vulcanoclásticos Lacustres	17
II.2.6 Tobas Limoarenosas	19
II.2.7 Basalto (Basalto Tambor)	20
II.2.8 Brecha Volcánica	22
II.2.9 Aluvión	23
II.2.10 Rocas Ígneas Intrusivas	23

Capítulo III Marco Estructural

III.1 Sistemas de Fallamiento Regional	25
III.1.1 Sistema de Fallamiento San Miguel de Allende-Taxco	25
III.1.2 Sistema de Fallamiento Chapala-Tula	26
III.2 Sistemas de Fallamiento Local	27
III.2.1 Sistema Taxco-Querétaro	27
III.2.2 Cuenca San Juan del Río	27
III.2.3 Falla Sierra de Enmedio	27
III.2.4 Cuenca de Querétaro	28
III.2.5 Falla Querétaro	29
III.2.6 Falla Tlacote	30
III.2.7 Falla Obrajuco	31
III.2.8 Falla Apaseo	32
III.3 Sistema Chapala-Tula	33
III.3.1 Fractura Cañada	33
III.3.2 Falla Menchaca	34
III.3.3 Falla Corregidora	34
III.3.4 Falla Huimilpan	35
III.4 Eventos de Deformación	35
III.4.1 Evento D1	37
III.4.2 Evento D 2	38
III.4.3 Evento D.3	39
III.4.4 Evento D 4	39

Capítulo IV Hidrología Subterránea

IV.1 Recarga y descarga de los acuíferos	41
IV.2 Unidades Geohidrológicas	43
IV.2.1 Unidad Geohidrológica I	43
IV.2.2 Unidad Geohidrológica II	44

IV.2.3 Unidad Geohidrológica III	45
IV.3 Balance de aguas subterráneas	46
IV.3.1 Ecuación de balance de aguas subterráneas	46
IV.3.2 Balance de aguas subterráneas	47
V Cuenca Unidad	
V.1 Concepto de continuidad Hidráulica	49
V.1.1 Concepto de Cuenca Unidad	50
V.2 Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de la Cuenca Unidad	52
V.2.1 Fundamento de la Propuesta de Continuidad Hidráulica en la Cuenca Unidad	56
V.2.2 Modelo de Flujo Subterráneo para la Cuenca Unidad	61
Conclusiones	65
Recomendaciones	67
Bibliografía	68

I Introducción.

El desarrollo de la Geohidrología en México tiene lugar en el marco de una explotación creciente de los recursos hidráulicos en general. En particular, las aguas subterráneas constituyen un elemento indispensable para el desarrollo de importantes zonas agrícolas e industriales y el abasto a las localidades urbanas cuyo crecimiento poblacional en México se vio incrementado de forma explosiva a partir de 1970.

La Geohidrología estudia el comportamiento de los acuíferos de una región ante la acción combinada de las recargas y descargas a que están sometidos pudiendo ser ambas naturales o inducidas. Normalmente los acuíferos se ven afectados por el uso irracional que se ocasionando su sobreexplotación. Los efectos que se manifiestan a corto y mediano plazo son lentos y poco espectaculares, pero una vez que se manifiestan ostensiblemente, la situación del acuífero suele ser crítica, en extremo difícil y muy costosa de remediar, además en un periodo de tiempo muy largo. En este sentido, una preocupación de los hidrogeólogos, es establecer sistemas que permitan una explotación racional del recurso, tendiente a utilizar los acuíferos eficientemente, sin exceder los límites naturales para su renovación, preservando de esta forma este valioso recurso natural.

Este es un estudio integral del área sur occidental del estado de Querétaro y en la parte Este de Guanajuato, la zona comprende la Cuenca de San Juan del Río, la Cuenca de Querétaro y la de los Apascos, en Guanajuato. Anterior a este, los estudios en el área se habían enfocado a hacer el análisis por separado de las tres cuencas. En este trabajo se plantea la posibilidad de que estas tres cuencas mantengan una estrecha relación en su comportamiento hidrogeológico. Para tal efecto se propone que las tres cuencas tienen continuidad hidráulica subterránea, ya que las características litológicas y estructurales que existe entre ellas permiten una conexión en el flujo subterráneo.

La existencia de la continuidad hidráulica en medios granulares y fracturados, así como de el fallamiento regional del área, permite establecer que las cuencas se rijan bajo el modelo de Cuenca Unidad establecido por József Tóth (1995), donde establece que "un cuerpo rocoso es continuo hidráulicamente a una cierta escala de tiempo, si un cambio de presión en

cualquiera de sus puntos puede producir un cambio en cualquier otro punto en un intervalo de tiempo que se pueda medir en una escala de tiempo específica". El modelo de Cuenca Unitaria cuenta con zonas de recarga, transición y descarga. En este trabajo se propone que la Cuenca de San Juan del Río sea la zona de recarga, ya que por sus características hidrogeológicas el flujo actúa de manera descendente, la Cuenca del Valle de Querétaro por sus características funcione como el área de transición o flujo lateral y la Cuenca de los Apaseos (Apaseo el Grande y Apaseo el Alto) sea la zona de descarga ya que aquí el flujo se comporta de forma ascendente, como ejemplo de ello tenemos la emanación de manantiales termales donde el agua alcanza temperaturas mayores a los 80°C.

Este tipo de modelo permite hacer una evaluación de manera regional y no de manera independiente como se estaba haciendo, logrando con esto un control hidráulico entre ellas para un manejo sustentable del recurso.

I.2 Objetivo.

Reforzar el estudio del aspecto estructural y su relación con el concepto Cuenca Unitaria de los valles San Juan del Río, Querétaro y los Apaseos propuesto por Macías, 2002.

I.3 Marco Físico.

Localización, extensión y límites.

La región de estudio se encuentra localizada en la porción sur-occidental del estado Querétaro y en la parte centro-este del estado de Guanajuato (Figura 1).

La zona comprende una superficie aproximada de 2880 km², sus límites son: Al Oeste el río de La Laja, en el estado de Guanajuato, al Norte una línea imaginaria que corta las estribaciones volcánicas de la zona de Santa Rosa de Jáuregui y la Solana; al Oriente por la Sierra de Enmedio y al Sur por La Sierra de San Juan del Río.

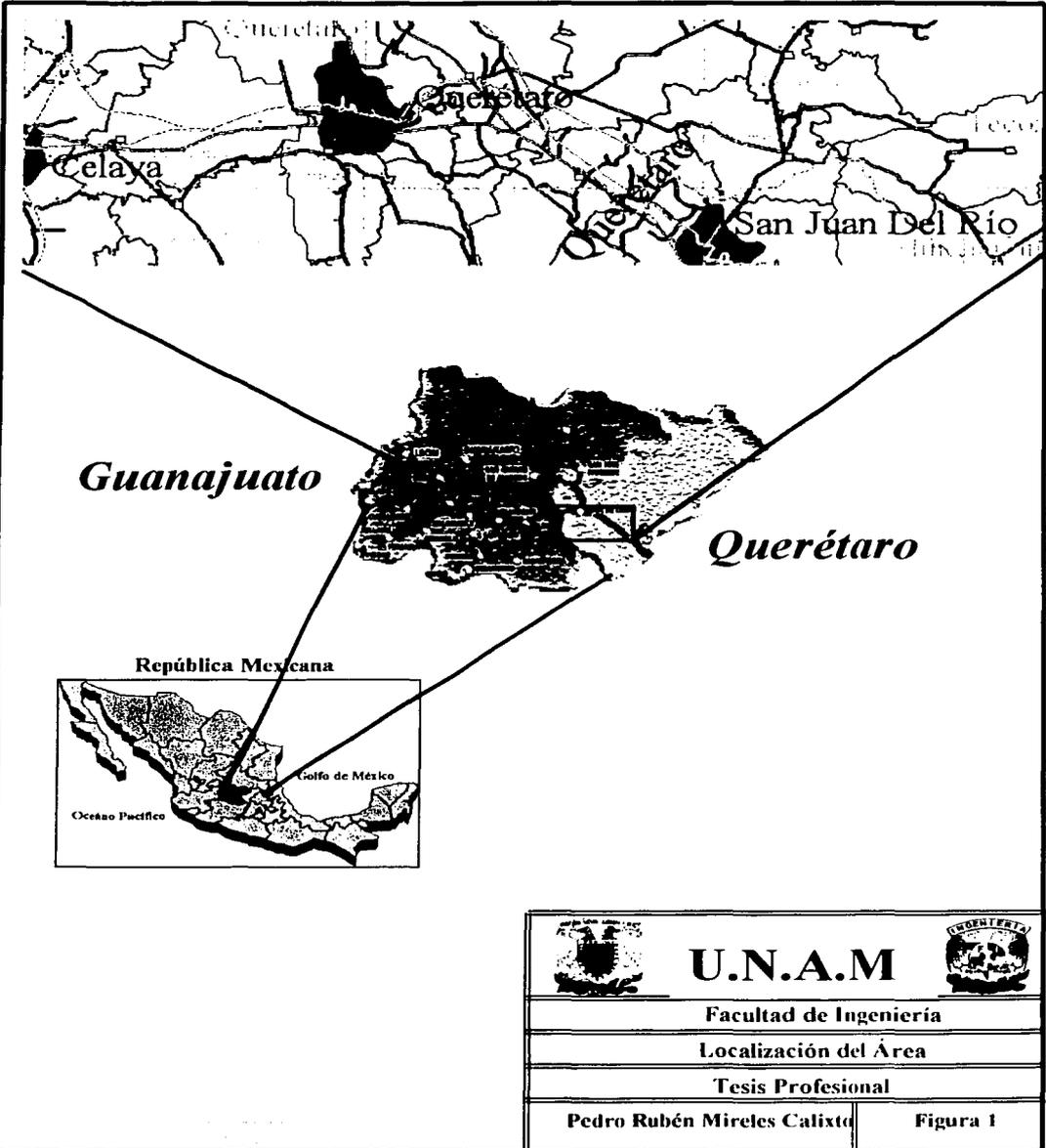
La superficie que ocupa este estudio, se localiza principalmente dentro del dominio de la Faja Volcánica Transmexicana en su porción septentrional ya que la Sierra Madre Oriental sólo queda incluido en menos del 2%.

I.4 Vías de Comunicación.

La zona cuenta con un amplia red de carreteras, que la mantienen comunicada principalmente con la capital del país y con los estados del norte. Como vías principales se encuentran las autopistas: México – Querétaro (No. 57), Querétaro – Celaya (No. 55), Querétaro – San Luis Potosí (No. 57) y la carretera federal México - Querétaro – Celaya.

Además, la red de caminos es complementada con carreteras estatales pavimentadas y de terracería, como son los de: Huimilpan, Tlacote el Bajo, Colón, Amascala, La Villa del Marqués, La Griega, El Nabo, La Solana, Tequisquiapan y Bernal entre otros.

Existe una terminal aérea en la capital estatal de que ofrece únicamente servicio nacional.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5 Clima.

Las condiciones medias que presenta la atmósfera en los registros de temperatura, presión y humedad en un periodo mínimo de 10 años, son las que determinan el clima del Estado de Querétaro, el cual se localiza dentro de la zona tropical recibiendo la influencia de los vientos húmedos del este, provenientes del Golfo de México.

La Sierra Madre Oriental, por su altitud y orientación noroeste-sureste, obstaculiza el paso de estas corrientes haciendo que se eleven y condensen, originando constantes precipitaciones en la vertiente oriental. Los vientos ya secos pasan a la vertiente interior, donde absorben la humedad superficial, creando las condiciones de sequedad o aridez que caracterizan a esta zona.

Todas estas características permiten que en el territorio estatal coexistan tres áreas climáticas. La porción sur que comprende la Sierra de Amealco, con un clima templado, concentra mayor humedad, misma que disminuye conforme se avanza hacia el norte. La región centro presenta el clima semi-seco, cuyas variantes van de cálidas a templadas en función de la altitud. El clima templado se presenta en la Sierra del Zamorano. Para el caso de la Sierra Madre Oriental, el clima varía de cálido a templado, influenciado por la diferencia de altitud.

En los municipios de Amealco y Humilpan, sobre lomeríos asociados a sierras con una altura superior a los 2000 msnm, se presenta el clima templado subhúmedo, con una temperatura media anual entre 13° y 17° C, con precipitaciones más abundantes en verano, cuya humedad aumenta hacia el sur originando tres subtipos de este clima, pues la diferencia en la precipitación media anual va de los 600 a los 800 milímetros.

En la parte central del Estado predominan los climas seco y semi-seco. Los lomeríos, las sierras y mesetas, impiden el paso de los vientos húmedos, que le dan a la zona su característica aridez, originando que la oscilación térmica esté entre los 7° y los 14° C. En la porción occidental del Estado, principalmente en los municipios de Querétaro, Corregidora, El

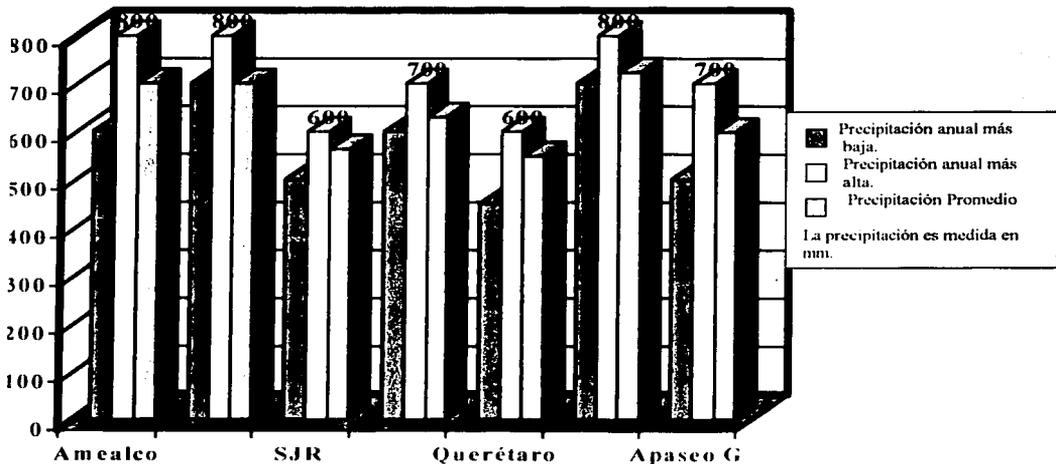
Marqués y la parte oeste de Peñamiller, el clima es semi-seco - semi-cálido, la temperatura media anual varía de 18° a 19° C y la precipitación anual entre 450 y 630 milímetros.

En una extensa área que va de este a oeste, desde el cañón del Río Moctezuma hasta el límite con Guanajuato, el clima es semi-seco-templado. En esta área la temperatura media anual oscila entre 16° y 18°C, y la precipitación media anual entre 450 y 630 milímetros.

En la tabla 1 y grafica 1 se muestran algunos datos de precipitación en la zona, la información fue tomada del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

Estación	Periodo	Precipitación Promedio	Precipitación año más seco		Precipitación año más lluvioso	
			año	Prec.	año	Prec.
Querétaro	1921-1999	548.8	1979	214.1	1933	999.2
S. J. R	1954-1998	563	1994	204.9	1958	853.4
Celaya	1921-1999	598	1999	315.6	1931	973.3

Tabla 1 Precipitaciones en el área de estudio, fuente INEGI, 2001.



Grafica 1. Que muestra las precipitaciones anuales: baja, alta y promedio respectivamente, tomada INEGI, 2001.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

II Marco Geológico Regional.

II. 1 Provincias Fisiográficas.

Faja Volcánica Transmexicana.

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es el arco volcánico que se desarrolla sobre la margen suroccidental de la Placa de Norteamérica, como resultado de la subducción de las Placas de Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco. La FVTM constituye uno de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circumpacífica. Entre sus rasgos peculiares se pueden citar: a) La presencia de un vulcanismo alcalino de tipo intraplaca (asimilado a los Ocean Island Basalt) especialmente asociado al vulcanismo dominante relacionado con la subducción, b) La oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera; y c) La notable variación del ancho del arco.

La FVTM se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental, que representan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de vulcanismo y su composición química. El área de estudio de este trabajo se encuentra en el sector central, los límites establecidos son el rift de Colima y el sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende conocido como el campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica y basáltico-andesítica. Los estratovolcanes están completamente ausentes, si se exceptúan los casos del cerro Tacintaro, La Gloria y el Cerro Culiacán.

La Faja Volcánica Transmexicana cambió la orientación de su eje mayor de arco, de NNW-SSE en el Oligoceno-Mioceno a E-W en el Plioceno reciente. Se sabe que la extensión dentro de los arcos tiende a ser perpendicular a su eje mayor (Hamilton, 1995) por lo tanto la dirección de extensión también cambió en el mismo intervalo de tiempo. En la parte central, el sistema de fallas normales Chapala -Tula, que tiene aproximadamente 450 km de largo por 30 km de ancho y es paralela al arco volcánico (Suter et al, 1995), según Jonson y Harrison (1990) estas fallas definen la zona de extensión N-S perpendicular a la faja Volcánica Transmexicana.

Sierra Madre Oriental.

La Sierra Madre Oriental está compuesta principalmente por rocas marinas Mesozoicas, deformadas por acortamiento producido por la Orogenía Laramide durante el Paleógeno y con poca o insignificante deformación extensional cenozoica (Alaniz-Álvarez, et al 2001), esta provincia se presenta solo en un 2 % dentro del área de estudio.

II.2 Estratigrafía.**II.2.1 Calizas y Lutitas (CL)****Distribución**

Esta unidad es la más antigua del área, forma el basamento sobre el que fueron depositadas todas las demás unidades rocosas existentes, se encuentra expuesta por la acción de un cuerpo intrusivo que levantó a esta unidad.

Afloran solo en la parte centro norte del área, en el poblado de Juriquilla, sobre una superficie burdamente semicircular de unos 7 km² aproximadamente. Más de la mitad de esta unidad se muestra cubierta por depósitos aluviales recientes, sobre todo hacia la parte noreste del afloramiento. En la localidad El Lobo, a 31 kilómetros al poniente de Juriquilla, un pozo las cortó a una profundidad de 200 metros. Esta unidad no se encuentra expuesta ni en la Cuenca de San Juan del Río ni en la de los Apascos.

Litología.

En otros trabajos, se ha considerado que esta unidad corresponde a rocas de la Formación Soyatal o Caracol, la cual consiste de una serie de lutitas calcáreas café grisáceas que intemperizan en café amarillento, con estratificaciones de capas de caliza gris en estratos de espesor medio a delgado (0.30 a 0.05 m) como puede observarse en la fotografía 1. Sin embargo las edades reportadas posteriormente no coinciden con esta asignación. Se presentan vetillas de calcita café claro y blanquecina. Las lutitas se encuentran intensamente plegadas, presentando gran fisilidad; en otros afloramientos de la misma zona se aprecia una inclinación de las capas de entre 45° y 60° en contacto con una secuencia de dacitas porfídicas a manera de



Fotografía 1. Calizas y Lutitas que afloran en el Municipio de Juriquilla, Querétaro.

Intrusión dentro de las capas de caliza y lutita: no se aprecian indicios de metamorfismo en estas rocas en la zona de contacto con las rocas dacíticas, solo se aprecia, a estas últimas, como elemento rígido que empujó y deformó a la caliza lutita con un desarrollo únicamente en fisilidad y clivaje en las capas calcáreas.

Espesor y edad.

No se tiene reporte del espesor de esta unidad, ni en los pozos perforados en la zona se han atravesado estas rocas. En el año 2000 la Comisión Estatal de aguas (CEAS) de Querétaro perforó en este punto un pozo de 900 metros, pero no se cuenta con el corte litológico.

Su edad ha sido determinada por su contenido fósil en el afloramiento de San Miguel de Allende, donde Chiodi et al. (1988) reportaron una amonita de edad Aptiana-Albiana (Figura 3).

II.2.2 Andesitas (A).

Distribución.

Esta unidad fue descrita en el Distrito Minero de Guanajuato por Echegoyén-Sánchez et al. (1970). Existen afloramientos de pequeña magnitud en toda el área estudiada,

predominando, en la parte norte-oeste. En contacto con las calizas se encuentra una pequeña exposición de forma irregular, Se observa en el camino que va del poblado el Nabo hacia la Hacienda San Miguelito. Un poco al sureste de este afloramiento se presentan otras exposiciones de rocas andesíticas en el cerro La Gallina y en el poblado de Mompani (Figura 2).

Hacia la parte noreste se encuentran afloramientos en el poblado de la Solana de macizos de andesita-dacita de coloración gris rosada y violácea, con amplias zonas de alteración; formando lomas de poca altitud y bien redondeadas. En la parte central se observan otras manifestaciones andesíticas, en el poblado de los Olvera y en Cerro El Picacho.

Hacia la parte centro Sur existen pequeños afloramientos semicirculares, ubicados al sur de Santa Teresa y colindando con el Cerro Tres; en donde se encuentra un corte de la carretera pavimentada que va de Querétaro a Huimilpan. En la Cuenca de San Juan del Río es la unidad litológica más antigua; por correlación con el estudio realizado en el Valle de Querétaro, se estima que esta unidad se distribuye regionalmente en el subsuelo por lo que forma un basamento volcánico extenso (GUYSA S.A de C.V, 1991). En la cuenca de Los Apaseos se encuentra en pequeños afloramientos.

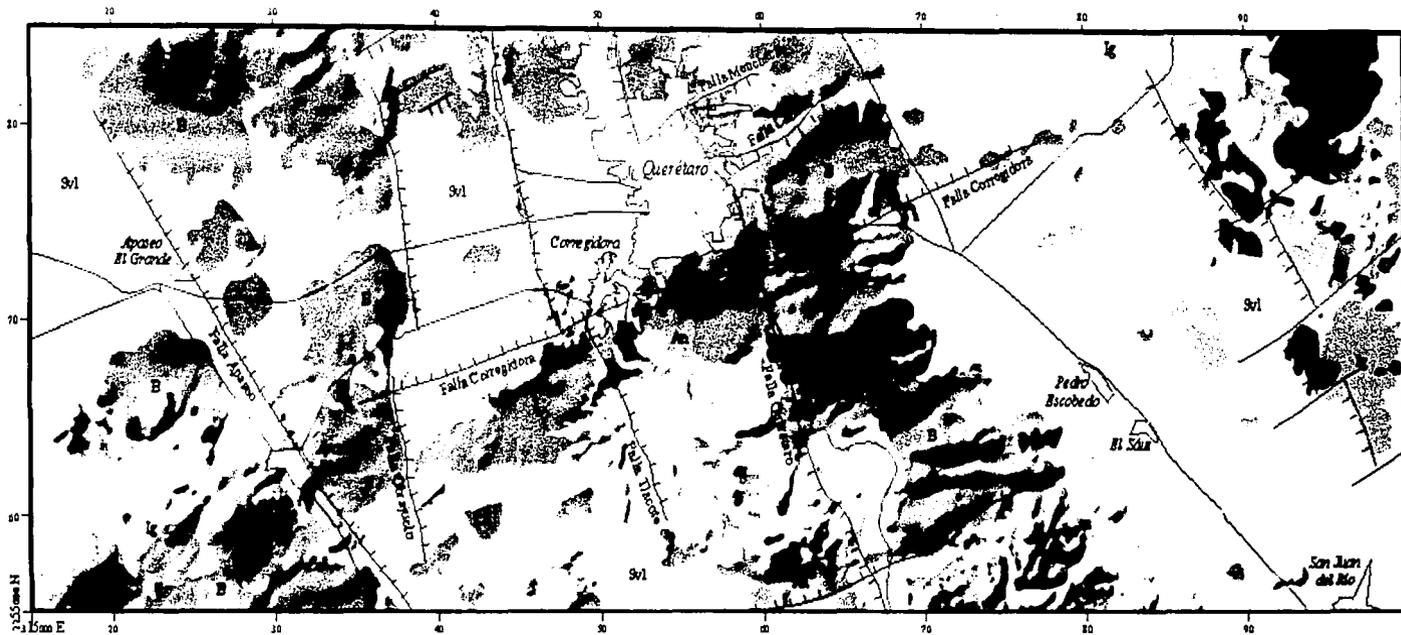
Expresión fisiográfica.

Los afloramientos al norte, centro y centro sur del área estudiada conforman prominencias redondeadas de suave pendiente. La parte sur es un macizo rocoso escarpado, de pendientes suaves a fuertes y cortada por abundantes y profundas cañadas.

Litología.

La unidad va desde una andesita pura hasta una andesita con cuarzo (dacita) y una traquiandesita, debida a la presencia o no de cuarzo que cuando menos representan un 10%.

Las texturas van desde porfídicas de matriz microcristalina, las coloraciones también van de gris rojizo a gris rosada. En todos los afloramientos la unidad se presenta muy fracturada en todas direcciones (Fotografía 2).



Modificado de Guysa, 1996 e IGC, 1998.

Por Héctor L. Macías 2002

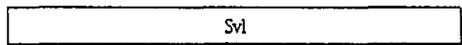
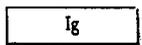
Cretácico Superior

Oligoceno

Mioceno

Plioceno

Pleistoceno-Reciente



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2 Mapa Geológico



Fotografía 2. Que muestra las Andesitas que afloran en la Cuenca de Querétaro .

Presenta fuertes alteraciones por procesos hidrotermales con reemplazamientos y fenómenos de dinanometamorfismo, como sucede en los afloramientos del poblado de Mompaní y la Solana, en donde la roca se ha pulverizado prácticamente y ha perdido totalmente la fábrica original quedando un polvo amarillento y rosado o violáceo muy deleznable. Hacia la parte sur ya no se presentan estos fenómenos de alteración tan pronunciados, aquí la roca es más densa y con mayor contenido de sílice pasando a ser una dacita porfídica. El macizo rocoso expuesto al sur puede corresponder a un emplazamiento somero subvolcánico, de coloración rosa.

Edad y espesor.

Esta unidad se ha considerado como el basamento andesítico no impermeable para los fines de este estudio, ya que no se ha atravesado en su totalidad en ningún pozo, a excepción del pozo Los Olvera en donde se cortó un espesor de 270 m pero sin que se considere el espesor total ya que se puede tratar de una especie de manto. La edad que se le asigna es

Oligoceno Medio, basada en los fechamientos K-Ar obtenidos por Cerca-Martínez et al. (2000) de 30.6 ± 0.4 M.a (Figura 3).

II.2.3 Ignimbritas. (Ig)

Distribución.

Estos depósitos, junto con los de San Juan del Río posiblemente provienen de la caldera Zamorano o Amcalco. Algunos afloramientos de esta unidad se encuentran en el área del Nabo, sobre el arroyo Mompaní. En el pozo el Nabo se cortaron 350 m de ignimbritas de textura brechoide tobácea, existen extensos afloramientos, ocurren hacia la parte nor-oriental cuya expresión fisiográfica corresponde a lomeríos con cañadas semi-abruptas, como el Cerro Blanco, Cerro el Picacho, Cerro La Cal, y dentro de los poblados El Lobo, El Rosario, Loma Larga y Loma de Navajas. En la Cuenca de San Juan del Río se encuentra en la Sierra de Enmedio y existen algunas localidades en el centro de San Juan del Río. En la Cuenca de Los Apaseos corresponden al tipo de roca más antigua, se encuentran en la sierra que se ubica en la parte sur, entre Rincón Tamayo y Apaseo el Alto (Figura 2).

Litología.

Constituyen una variada litología, que va desde depósitos piroclásticos, tobas soldadas, con fragmentos de cuarzo en una matriz criptocrystalina, presentan pseudo estratificación graduada; se tienen también derrames vitreos bien estratificados con líneas de fluidez bien definidas. En la Cuenca de San Juan del Río la mineralogía está compuesta por cuarzo, vidrio ácido, sanidino y plagioclasas; como minerales accesorios ferromagnesianos alterados, minerales arcillosos y óxidos de hierro, el grado de alteración es variable observado caolinización y oxidación en algunas zonas, ambas asociados a fenómenos hidrotermales (Fotografía 3).

Edad y Espesor

Los afloramientos de la parte nororiental parecen ser de mayor espesor que los que se presentan en la parte norte y centro ya que estos últimos tienen espesores delgados, de pocas decenas de metros; la edad de esta unidad se ubica en el Oligoceno Tardío. Aguirre-Díaz y

Martínez-López (en prensa) reportan una edad $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}^{39}$ de 29.3 ± 3 M.a para estas rocas (Figura 3).



Fotografía 3. Ignimbritas, en la Fractura Cañada en la Cuenca Querétaro, municipio el Márquez.

II.2.4 Basalto Lajeado. (BI)

Distribución.

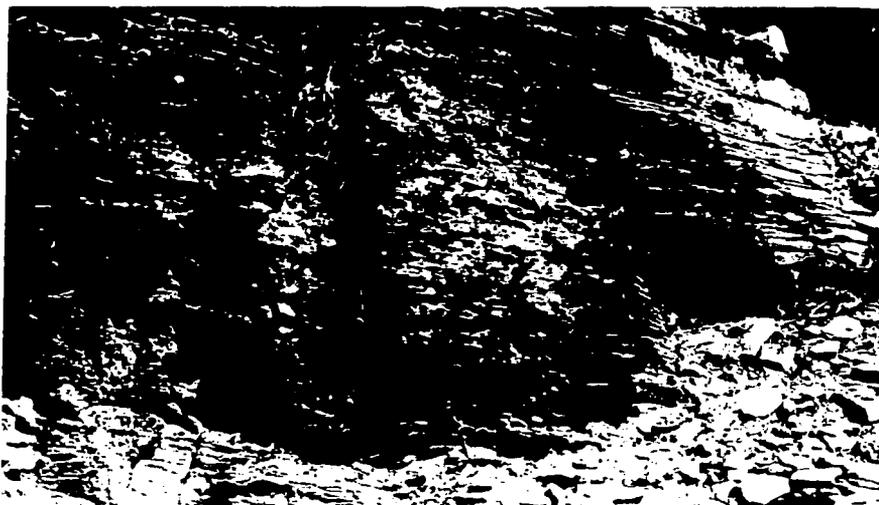
Se presenta en la Tinaja de la Estancia, en San Miguelito, al poniente de Santa Rosa de Jáuregui; al norte de Mompaní y el Nabo, al sur de Tlacote el Bajo y en la inmediaciones de Santa Teresa. En la Cuenca de San Juan del Río se encuentra aflorando en la Sierra de Enmedio sobreyaciendo a la unidad de ignimbritas. En la Cuenca de Los Apaseos está formado por elevaciones topográficas ubicadas al norte del área; al norte de Apaseo el Grande está constituido por una alternancia de corrientes lávicas de tipo andesítico y basálticos (Figuras 2 y 4).

Litología.

Está constituido por un Basalto negro de textura afanítica, pilotaxítica porfídica, microcristalina, en una matriz compacta, con planos de fracturamiento algunas veces

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

oxidados, de diferente tonalidad. La composición mineralógica que caracteriza a esta unidad son plagioclasas, olivino, anfíboles, ferromagnesianos que la clasifican como basáltica. Presenta fracturamiento secundario por efectos de esfuerzos tensionales, disgregando la roca y produciendo un lajamiento en diferentes direcciones (Fotografía 4). Se clasifica como un basalto andesítico.

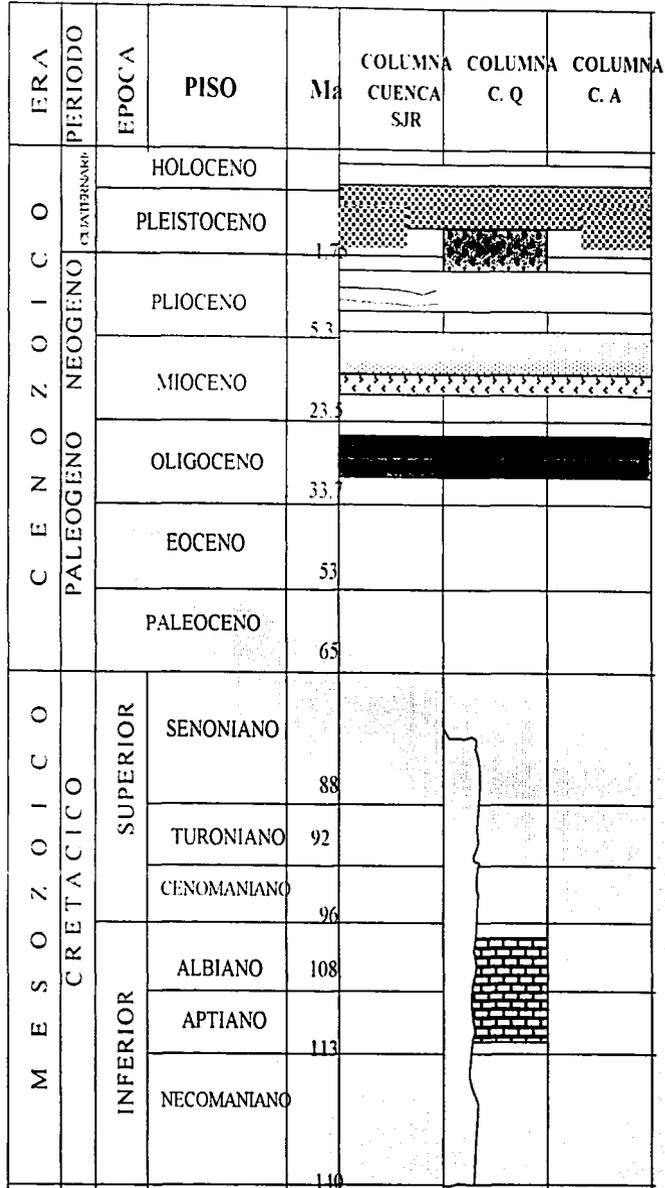


Fotografía 4. Que muestra la exposición de los Basaltos Lajeados, Cuenca de Querétaro, Municipio de Tlacote el Bajo.

Espesor y Edad.

En algunas zonas existen afloramientos con un espesor de 2 a 4 m pero en otras no se ha podido medir ya que está expuesto en cortes de más de 10 a 20 m. sin encontrarse expuesta su base. Su edad se ubica en el Mioceno medio (9.9 ± 0.4 M.a, Valdez-Moreno et al. 1998), (Figura 3).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



NOMENCLATURA

- ALUVIÓN (Al) Depósitos constituidos por boleos, gravas y arenas en matriz arcillosa.
- BRECHA VOLCÁNICA (Bv) Brecha volcánica de composición basáltica intercalada con basaltos.
- BASALTO EL TAMBOR (B) Posiblemente de fisura.
- TOBAS LIMOARENOSAS (T) Tobas limoarenosas café claro a oscuro, en CSJR están compuestas de granos gruesos a bloques intercalados con andesitas.
- SEDIMENTOS VULCANOLACUSTRES (SvL) Sedimentos vulcanolacustres, es un depósito vulcano-sedimentario complejo constituido por limos, arcillas, arenas de diferentes granulometría, pumiciticas blancas a gris claro, con estratificación cruzada e interdigitadas con gravas y gravillas con intercalaciones de coladas basálticas y andesíticas, en la CA está constituida por mesetas de basalto, secuencias volcánicas y lavas andesíticas.
- BASALTO LAJEADO (BL) Basalto lajeado negro, gris oscuro.
- IGNIIBRITAS (Ig) Rocas de composición ácida, presentan alteraciones hidrotermales de caolín y oxidación. Fracturamiento columnar marcado, asociado a escarpes pronunciados y algunas dislocaciones debido al fallamiento tipo normal.
- ANDESITAS (A) andesitas de coloración gris a rojiza, presenta fracturamiento en todas direcciones, así como alteraciones por procesos hidrotermales.
- IGNEAS INTRUSIVAS (Igl) Rocas de composición granítica, de color gris claro muy alterada.
- CALIZAS Y LUTITAS (CL) Consiste de una serie calizas intercaladas con lutitas, con estratificaciones de espesor delgado y sumamente plegadas.

- Referencias
- Chiodi et al. (1988)
 - Cerca-Martínez et al (200)
 - Aguirre-Díaz en prensa
 - Valdez-Moreno 1998
 - guysa 1996
 - Ingeniería Geológica Computarizada 1998.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 3. Columna Geológica

II.2.5 Depósitos Volcanoclásticos Lacustres (SvL).

Distribución.

Se identificó en gran parte de la zona, forma las planicies de las tres cuencas en enormes extensiones (Figura 2).

Litología.

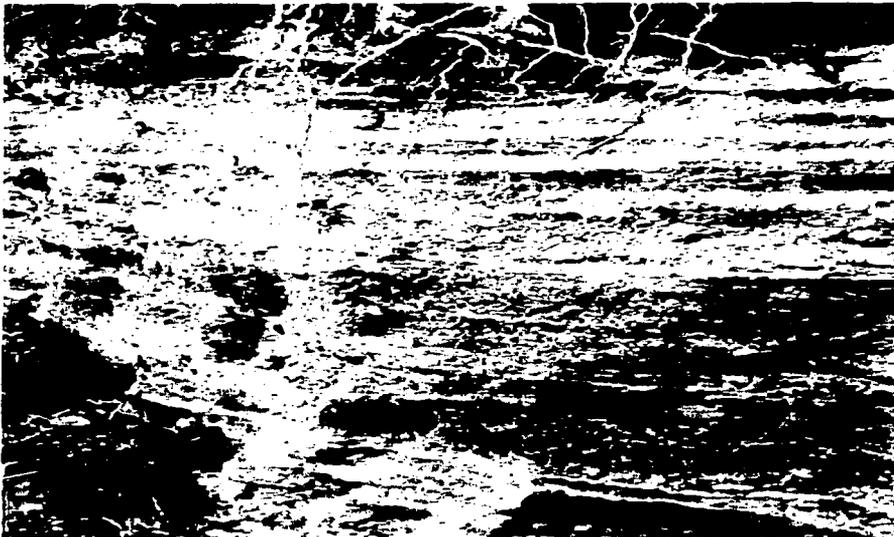
En la cuenca de Querétaro está dispuesto un depósito complejo con textura piroclástica-epiclástica de materiales no consolidados que varían ampliamente en su granulometría, desde detritos con transporte reducido semiangulosos a redondeados muy gruesos, hasta limos y arcillas con coloraciones cremas rojizas y verdosas. Petrográficamente se ha clasificado como una toba arenosa de origen vulcanosedimentario de caída libre con un transporte reducido.

Se tienen horizontes de arenas muy finas de color blanco grisáceas, pumíticas, a gruesas y muy gruesas de color blanco pardas algunas parcialmente consolidadas. Su estructura es prácticamente horizontal o con una pequeña pendiente en algunos casos, presenta estratificación cruzada, con estratos gruesos a laminares e interdigitados entre sí (Fotografía 5). Dentro de estos depósitos se encuentran intercaladas coladas de lavas andesíticas y/o basálticas de espesor variable, que van desde unos pocos hasta algunas decenas de metros.

En la Cuenca de San Juan del Río se encuentran sobreyaciendo al basalto lajeado, tobas arenosas de tipo lapilli, de granulometría media a gruesa no consolidada, de coloración gris oscura a negra. Se caracteriza por fragmentos líticos de basaltos y andesitas redondeados a subredondeados, presentando estratificación cruzada. En la base se observa una capa de ignimbrita de 2 m de espesor que contiene fragmentos angulosos de pómez de color oscuro, poco consolidada, con fracturamiento vertical que forma pilares.

También existen horizontes de tobas de texturas variables; en la base lapilli estratificado de granulometría gruesa; en la parte media depósitos de pómez de grano grueso en estratos de 30 a 50 cm con bloques vítreos menores a 15 cm en una matriz tobácea; en la parte superior depósitos de pómez de granulometría gruesa en estratos de mayor espesor (50 a

70 cm); esta unidad tiene un espesor variable de 9 a 10 m. Otro depósito ignimbrítico de parcial a densamente compacto, gris oscuro, con fracturamiento vertical, contiene pómez, líticos y vidrio en una matriz de toba fina; tiene un espesor de 8 a 9 m. Existe otra secuencia de tobas de piroclastos no compactos de granulometría media a gruesa en una matriz fina; tiene un espesor de 5 a 6 m. Sobreyaciendo a esta unidad existen ignimbritas compactas de textura piroclástica; su composición varía de riolítica a andesítica; el tamaño de los fragmentos de roca es variable. El espesor de esta unidad es de 7 m y aumenta en dirección de la caldera de Amealco.



Fotografía 5. Donde se observan los depósitos Volcánico Lacustre, puede observarse la diferente granulometría.

Espesor y Edad.

Los espesores de estos sedimentos en la cuenca de San Juan del Río varían de unos cuantos metros hasta algunos cientos de metros (340 en el pozo de loma Bonita); el espesor en el Valle de Querétaro va desde unos cuantos metros a más de 500. La edad de este depósito se le asigna al Mioceno-Plioceno (Figura 3).

II.2.6 Tobas Limo arenosas (T).

Distribución, Litología y espesor.

Sobreyaciendo a la unidad anterior se encuentran los depósitos tobáceos y limos arenosos café claro a oscuro, amarillentos en estratos horizontales de diferentes espesores, que forman grandes planicies fácilmente erosionables (Fotografía 6). Su potencia es mucho mayor en la parte oriental que hacia la parte sur en donde alcanza de 1 a 3 m de espesor. En la cuenca de San Juan del Río estas tobas son de color amarillo claro y pardo, de granos gruesos a bloques que están empacados en una matriz arcillo limosa intercaladas con andesitas. Se encuentran expuestas en la Sierra de Enmedio y en la margen izquierda de la presa Constitución de 1917.



Fotografía 6 Que muestra la Tobas limo-arenosas pertenecientes a la CSJR.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.2.7 Basalto. B (Basalto Tambor).

Distribución.

En la cuenca de Querétaro, sobre las tobas limoarenosas están dispuestos derrames de basalto de olivino color negro, que forma extensas mesetas terminadas en cantiles de 1 a 5 metros de espesor, se observa en el Cerro de La Cruz, Las Campanas, Cerro Gordo y el Tambor. Coladas pertenecientes a esta unidad se encuentran intercaladas con los depósitos aluviales del valle de Querétaro. En la cuenca de San Juan del Río a las tobas, le sobreyacen rocas basálticas y brechas volcánicas distribuidas en gran parte de la cuenca. En la cuenca de Los Apaseos se encuentran aflorando en gran parte del área, constituyendo tanto conos volcánicos como mesetas, están interdigitados en el subsuelo con aluviones y sedimentos lacustres (Figura 4).

Litología y Espesor.

Se ha clasificado como basalto de olivino negro, con texturas afanítica, holocristalina, microlítica y muy denso, aunque también se confunde con series volcánicas calcoalcalinas anteriores (andesita alterada). Por las expresiones fisiográficas que presenta se estima que son coladas producidas a través de fisuras en zonas de distensión. En la Cuenca de San Juan del Río se encuentra integrada por basaltos y brecha volcánicas de composición básica.

En los basaltos se observan coloraciones que varían de gris oscuro a negro, presentan una textura afanítica muy vesicular; la mineralogía se compone de plagioclasas, piroxenos, ferromagnesianos y biotita. Presenta un fuerte lajeamiento. La edad que se asigna a esta unidad es Pleistoceno-Holoceno.

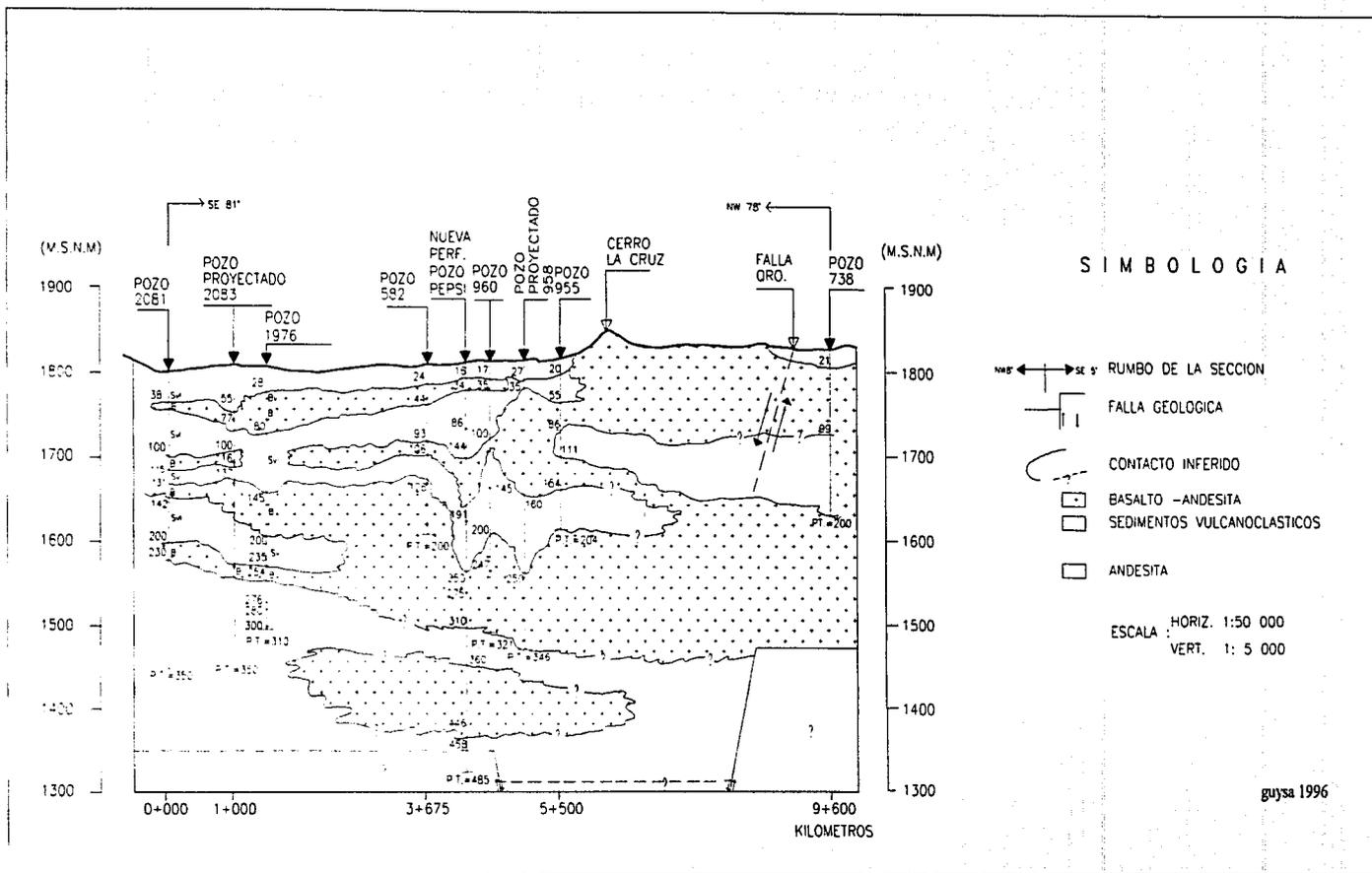


Figura 4. Sección Geológica Representativa, Valle de Querétaro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.2.8 Brecha Volcánica (Bv).

Distribución.

Se observa en la cima del Cerro Cimatario, forma el Cerro El Nabo, se encuentra sobre las márgenes del río Querétaro, sobre el Cerro Muerto y Cerro de la Campana sobre el corte de la carretera que conduce al Penal y en el extremo NW de la zona estudiada (Figura 2 y Fotografía 7).

Su textura es brechoide de tezontle típico, presenta coloraciones de gris oscuro a rojiza; es peculiar una oxidación limonítica y hematítica que se observa en los afloramientos localizados sobre la zona del Obraje en San Pedrito el Alto y en las márgenes del Río Querétaro en donde se pueden ver oquedades de tamaño considerable.



Fotografía 7. Donde puede observarse el Cerro Cimatario constituido por brechas volcánicas

Litología.

Dentro de estas brechas se ha detectado la acumulación de sílice cristalino y lechoso con superficies botroidales, también se tienen rellenos de carbonatos, que han colmado cavidades y planos de fractura, originando en la roca una menor permeabilidad. En la Cuenca de San Juan del Río varían de rojizo a gris oscuro, su textura es afánítica de estructura

brechoide, con algunos bloques de basalto, bombas volcánicas y fragmentos de pómez en una matriz fina, se observa con alto grado de alteración de los minerales ferrosos. Se asignó a esta una unidad una edad relativa Cuaternario Pleistoceno-Holoceno (Figura 3).

II.2.9 Aluvión (Al).

En la Cuenca de San Juan del Río se encuentra distribuido principalmente en los cauces de arroyos, ríos y lagos. También se encuentran cubriendo a las tobas que rellenan los extensos valles, el espesor es muy variable 20-30 cm y de 1-5 m; en algunos cortes litológicos de pozos perforados en el valle de San Juan del Río se encontraron espesores desde unos centímetros hasta 5 m (pozo Pedregoso). En la cuenca de Querétaro constituye valles de todos tamaños formando grandes planicies (Figura 2).

Su litología esta constituida por gravas y boleos en matriz arcillosa, limosa y arenosa, con espesores variables de unos centímetros hasta 10 m detectados en el centro del Valle de Querétaro.

En la Cuenca de los Apaseos corresponden arenas, arcillas y gravas, que se encuentran rellenando las partes bajas y formando el Valle de los Apaseos.

II.2.10 Rocas Ígneas Intrusivas (Igl).

En el área estudiada, además de ser una provincia volcánica se han detectado intrusiones ígneas. Considerándose entonces como una provincia volcánica con condiciones plutónicas. Ejemplo de estos intrusivos se encuentran en las inmediaciones del fraccionamiento de Juriquilla (Fotografía 8), al norte de la Ciudad de Querétaro donde se encontró una roca granítica de color gris claro, de textura porfídica muy alterada.

Efectos colaterales del fenómeno intrusivo corresponde con manifestaciones de hidrotermalismo en un radio importante, esto se puede ver en los poblados de Mompaní con diques satélites, este poblado se encuentra en la parte occidental de Juriquilla, también en La Solana, San Pedrito el Alto y Cerrito Colorado, donde pueden verse rellenos neumatolíticos; otros afloramientos se tienen en la colonia Loma Bonita y al Sur del Salitre.



Fotografía 8. Manifestaciones del levantamiento causado por el cuerpo intrusivo. En las cercanías del municipio de Juriquilla

Estos fenómenos de hidrotermalismo están íntimamente asociados a diques concordantes de granito, formados a partir de plutones graníticos (Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V. 1991).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III Marco Estructural

III.1 Sistemas de Fallamiento Regional.

En la región se tiene la intersección de los sistemas de fallas Taxco-San Miguel de Allende con orientación NNW-SSE y Chapala-Tula con orientación ENE-WSW, formando un conjunto de fallas ortogonales (Figura 5).

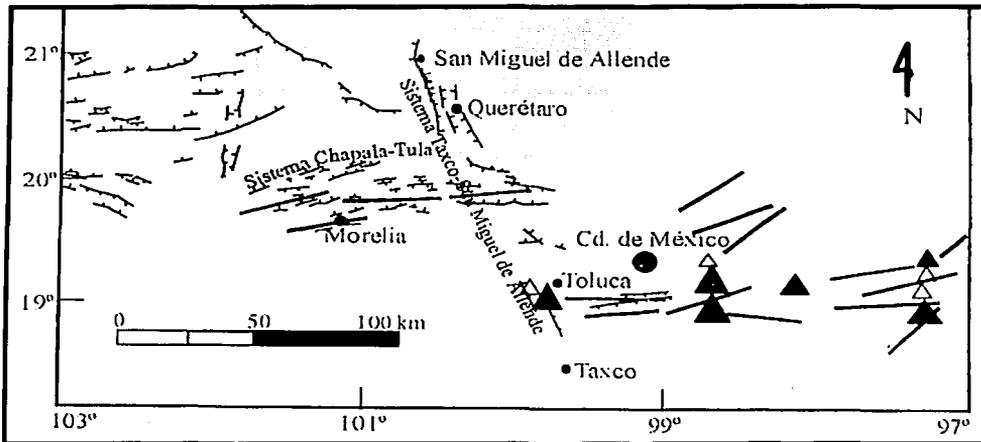


Figura 5 Se pueden observar los sistemas de fallas existentes en la zona, el sistema San Miguel de Allende-Taxco y el sistema Chapala-Tula (modificado de Alaniz-Álvarez et al 1998).

III. 1.1 Sistema de fallamiento San Miguel de Allende-Taxco.

El sistema de fallamiento San Miguel de Allende-Taxco fue nombrado así por Demant (1978), quien le dio el carácter de falla de desplazamiento lateral derecha con dirección NNW-SSE, tiene más de 30 km de ancho y 500 km de longitud, se ubica entre bloques corticales con distinto espesor y distinta topografía y ha influido en los patrones de fallamiento de la deformación Cenozoica de México central (Alaniz-Álvarez et al, 2001).

Ha sido considerado por varios autores como una estructura profunda del basamento que forma un límite entre el Terreno Guerrero al Oeste y la Sierra Madre Oriental al Este (Garduño-Monroy y Gutiérrez-Negrín, 1992; Ferrari et al., 1994a), también ha sido propuesto como el límite entre la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central (Nieto-Samaniego et al.,

1999c). Una característica geomorfológica de esta estructura es el desnivel topográfico que ocasiona, al Este la altura promedio es de 1400 m.s.n.m y al Oeste de 2100 m.s.n.m.; otra característica notable ha sido el lineamiento de estructuras tales como volcanes y calderas. Alaniz-Álvarez et al; (1998) observaron que sobre este sistema de fallamiento se alinean once estructuras volcánicas: Palo Huérfano, San Pedro, La Joya, Cimatario, Cerro Grande, Volcán Ñado, Cerro la Guadalupeana, Nevado de Toluca, Volcán San Antonio y las calderas de Mazahua y Amealco.

Johnson y Harrison (1990), estudiaron éste sistema nombrándolo sistema de fallas Taxco-Querétaro y le asignaron una edad de actividad anterior al Plioceno, basándose en rasgos neotectónicos y en el corte de rocas Pliocénicas.

Por otro lado, se ha observado que separa dos estilos de volcanismo en la faja Volcánica Transmexicana. Ferrari (2000) considera que desde el rift de Colima hasta el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende, el volcanismo de la faja es principalmente monogenético y de composición andesítica. Mientras que al oriente del sistema el volcanismo predominante es poligenético.

III.1.2 Sistema de Fallamiento Chapala-Tula.

El Sistema de fallas Chapala-Tula nombrado así por Jonson y Harrison (1990), es casi paralelo al eje mayor de la Faja Volcánica Transmexicana, su orientación es WSW-ENE, tiene aproximadamente 450 km de largo y 50 km de ancho; se extiende a lo largo del paralelo 20 y termina abruptamente cerca del sistema de fallamiento San Miguel de Allende-Taxco. Este sistema se considera el responsable del origen de la zona de fallas que ha deformado la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (Suter et al., 1995). Está constituido por fallas normales de alto ángulo con una componente lateral izquierda, estas fallas forman escarpes de más de 50 m de altura; entre estas esta la falla de Acambay que se encuentra activa. Lo que define que el sistema es reciente son: la sismicidad de varias fallas y el desplazamiento de depósitos lacustres cuaternarios y de rocas volcánicas plioceno-cuaternarias. (Pascuaré et al., 1991; 1992 y Suter et al., 1995).

Suter et al. (1995) propusieron que el alto nivel de flujo de calor, la actividad volcánica y el fallamiento extensional somero sin-volcánico y post-volcánico sugieren que la zona de falla Chapala-Tula corresponde a una zona de rift activo. Aunque no se ha documentado la estructura y espesor de la corteza y litosfera bajo la zona de falla, aunado a la pequeña cantidad de extensión cortical para sugerir una zona de rift.

III.2 Sistemas de Fallamiento Local.

III.2.1 Sistema Taxco-Querétaro.

El sistema Taxco-Querétaro de rumbo N-S es notable en el aspecto geomorfológico ya que da lugar al graben de San Juan del Río, Querétaro y Los Apaseos. Este sistema de fallamiento se compone de múltiples fallas de tipo normal desplazadas por el sistema Chapala-Tula. Las principales Fallas que pertenecen a este sistema que se encuentran en el área son la Falla Sierra de En medio, Falla Querétaro (activa), Falla Tlacote(activa), Falla Obrajuelo (activa) y Falla Apaseos también activa.

III.2.2 Cuenca San Juan del Río.

La Cuenca de San Juan del Río tiene un lineamiento NW-SE, está limitado al NE y SW por dos sierras: La Sierra de Enmedio y la Sierra del Sur respectivamente. De la interpretación estructural se observan a profundidad la presencia de bloques caídos y levantados con una orientación preferencial NW-SE ocasionados por fallamiento normal, el tren estructural se puede interpretar como un graben con una caída de 350 m de profundidad y está relleno por depósitos piroclásticos intercalados con algunos derrames de composición básica y en menor proporción material aluvial. En Oligoceno se dieron inicio esfuerzos distensivos que formaron este graben.

III.2.3 Falla Sierra de Enmedio. (Sistema San Miguel de Allende-Taxco).

Falla normal que se localiza en la parte oriental del área, presenta una alineación NW-SE con una longitud promedio de 40 km, en los escarpes de esta se pueden observar rocas volcánicas ácidas y básicas, las rocas ácidas están constituidas por ignimbritas que presentan fracturamiento vertical muy denso, una de las características principales de esta roca es que su

escarpe varía de 50 a 70 m, coronando a esta secuencia se encuentran depósitos de basaltos. La edad de la falla esta asignada al Oligoceno (Fotografía 9).



Fotografía 9. Falla Sierra de Enmedio vista hacia el Oriente, localidad La Griega.

III.2.4 Cuenca de Querétaro

Corresponde a un extenso valle de forma alargada en dirección norte-sur, relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos volcanoclásticos lacustres; de unos 500 ± 100 metros de espesor.

Este valle es el resultado del hundimiento producido por un sistema de fallamientos escalonados producidos por esfuerzos distensivos dirigidos hacia el poniente y al oriente respectivamente, con fallas ordenadas casi simétricamente y notoriamente equidistantes con orientación noroeste-sureste entre los 10° y 15° ; son fallas de echado alto, extendiéndose más hacia la parte occidental (Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V, 1991).

Las márgenes del graben se presentan asimétricas, observándose más escarpadas hacia la parte oriente, coincidiendo generalmente con la traza de una de las fallas principales. El

sistema de fallas activas principales que conforman el graben son tres: Falla Querétaro, Falla Tlacote y Falla Obrajuelo.

III. 2.5 Falla Querétaro (sistema San Miguel de Allende-Taxco)

La falla Querétaro es de tipo normal y tiene una longitud de 61 km, se dividió en tres sectores: La traza de la falla Querétaro en su sección norte es evidenciada por el límite poniente del alto topográfico entre San José Iturbide y Santa Rosa de Jáuregui (Alaniz-Álvarez et al, 2001). tiene una longitud de más de 10 km, pone en contacto ignimbritas riolíticas de 29.3 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, en prensa) y basaltos del Mioceno medio, con depósitos sedimentarios pertenecientes a la unidad de arenisca y conglomerado cenozoicos, la falla Querétaro en su sección norte no corresponde al área de trabajo.

El sector central de la Falla Querétaro, con aproximadamente 15 km de largo, no muestra un escarpe bien desarrollado, aunque en algunas localidades se puede observar el escarpe de aproximadamente de 80 m. La falla Querétaro en su sector sur con una traza de 25.5 km de largo, muestra una orientación N22°W (Fotografía 10). Esta falla corta a los basaltos lajados a lo largo de su escarpe (Alaniz-Álvarez et al., 2001). La roca más joven desplazada por esta falla corresponde a las lavas del volcán Cimatario. La falla Querétaro-sur inicia en el corte ocasionado por la falla Menchaca al NE de la ciudad de Querétaro y que le causó un corrimiento aproximado de 3 Km en dirección ENE.

La Falla Querétaro termina en la falla Huimilpan de rumbo N80°E cuyo escarpe se observa con un grado mínimo de erosión. La actividad a lo largo de la falla ocurrió en tiempos diferentes, presentándose la más antigua en el sector norte, entre los 10 y 7 Ma, y la más joven hacia el sur, donde tuvo actividad en el Mioceno tardío, posterior a los 5.3 Ma (Alaniz-Álvarez et al., 2001).



Fotografía 10 Falla Querétaro Sur, vista desde el flanco Sureste del Cerro del Cimatario, donde se construye en la actualidad (abril 2002), un fraccionamiento en una zona de recarga muy importante.

III.2.6 Falla Tlacote (sistema San Miguel de Allende-Taxco).

Falla de tipo normal, su escarpe se observa por más de 20 km presenta una orientación $N16^{\circ}$ W. Atraviesa el poblado de Tlacote el Bajo hacia el norte y el poblado de Balvanera hacia el sur; también presenta un desplazamiento al oriente siguiendo la dirección de los poblados la Negreta a Puerta San Rafael; tiene aproximadamente 15 Km de longitud (Fotografía 11).

En el poblado de Tlacote tiene un salto máximo de 110 m y en poblado de Balvanera tiene un salto máximo de 50 m; tanto en el bloque del alto como del bajo se observan el Basalto Querétaro.

La edad de esta falla es menor a los 7.5 M.a (Alaniz-Álvarez et al., 2001).



Fotografía 11 Falla Tlacote, en primer plano el río Querétaro, localidad Las Adjuntas.

III.2.7 Falla Obrajuelo

Atraviesa el poblado de Obrajuelo en el estado de Guanajuato; hacia el sur, pasa por un costado de la Laguna Salitre (Fotografía 12). En bloque del alto de la falla se tienen manantiales de agua caliente activos y remanentes de estos lo que significa que se trata de una falla muy profunda (falla clásica de extensión) posiblemente activa; paralela a está, a unos 200 metros se pueden observar fracturas en formación de aproximadamente 6 m de ancho y más de 2 kilómetros de longitud.

La Falla Obrajuelo mide aproximadamente 27 km, (Lopez Hernández, 1996) en el poblado de Obrajuelo, la orientación de la falla varía de NNW a N-S es de tipo normal con un salto máximo de 100 m, en el sector norte y salto de 60 metros en el sector sur. La edad de la falla se infiere sincrónica con la falla Tlacote.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el extremo norte de la falla Obrajuelo cerca del poblado de Ixtla, en el Rancho de los Saucedo, también puede observarse un manantial permanente con una temperatura de 29°C, este sale por tobas líticas con un caudal de 5 lps; alrededor de esta área existen otros manantiales pero de menor caudal.



Fotografía 12. Falla Obrajuelo, vista hacia la Autopista, desde el predio El Salitre, en primer plano se observan relictos de surgencias antiguas.

III.2.8 Falla Apaseo (sistema San Miguel de Allende-Taxco).

Falla normal con rumbo de N35°W . presenta escarpes de 50 m como máximo, este escarpe se observa en ignimbritas brechadas y muy intemperizadas (Fotografía 13). Se pueden observar también fracturas verticales de 5 a 10 cm, de estas fracturas brota el manantial Atl con un caudal de 6 litros por segundo aproximadamente. La edad de esta falla se asigna al Mioceno.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 13. Que muestra el plano de la falla Falla Apaseo en forma de escarpe, localidad Apaseo el Grande.

III. 3 Sistema Chapala-Tula.

El sistema Chapala-Tula está caracterizado por la presencia de fallas normales con componente de desplazamiento lateral izquierdo (Suter et al., 1992), de dirección generalizada WSW-ENE. Las principales fallas de este sistema son la falla Corregidora, falla Menchaca, fractura Cañada, que cortan las fallas del sistema Taxco-Querétaro y que interconectan las cuencas de San Juan del Río, Querétaro y los Apaseos.

Se detectan lineamientos con orientación noroeste-sureste dentro de los 30° como principales y otro sistema de lineamientos controlados también por los esfuerzos tensionales del mecanismo del graben y paralelos a la dirección de máxima tensión.

III.3.1 Fractura Cañada

La Fractura o Falla Cañada es transversal al graben, se inicia sobre el río Querétaro, en el poblado de la Cañada y continúa al poniente por Calera de Obrajuelo y Calera de Ameche.

Tiene una orientación ~ E-W con una longitud aproximada de 8 km. Corta una secuencia de basaltos, tobas ignimbríticas y brechas volcánicas. Paralela a ésta, al norte, se encuentra la falla Menchaca de las mismas características anteriores.

III.3.2 Falla Menchaca.

La falla Menchaca es de tipo normal, buza al SE, tiene aproximadamente 9 km y su escarpe presenta un salto de 60 metros. Como ya se mencionó anteriormente esta falla causó un corrimiento a la falla Querétaro de 3 km, este segmento es nombrado por Alaniz-Alvarez et al 2001 como Falla Salitre. La falla expone en su flanco poniente rocas de 30 Ma.

III.3.3 Falla Corregidora.

La Falla Corregidora es de tipo normal, está compuesta por varios segmentos con orientación N70°E. Estas estructuras cortan a la Falla Obrajuelo, Falla Tlacote y la Falla Querétaro a la altura del volcán Cimatarío. En el bloque del alto se depositaron sedimentos lacustres y aluviales. El desplazamiento vertical de esta falla es aproximadamente de 90 m (Fotografía 14).



Fotografía 14. Plano de la Falla Corregidora.

III.3.4 Falla Huimilpan.

La Falla Huimilpan, con orientación N80°E y buzamiento al N, tiene una longitud de aproximadamente 20 kilómetros y corta a la falla Querétaro sur, tiene un escarpe bien definido con un desnivel entre 50 y 100 metros. En el bloque levantado afloran rocas volcánicas ácidas y en el bloque hundido material epiclástico.

Con la imagen Landsat a escala 1:250,000 en respuesta a color de tomas infrarrojas se analizaron los principales lineamientos de carácter regional. En esta imagen están representadas las fallas principales de el área de trabajo (Figura 6).

III.4 Eventos de Deformación.

Le edad, la cinemática y la magnitud de desplazamiento de las fallas de la región muestran que el área estuvo involucrada en varios eventos de deformación desde el Oligoceno hasta el Reciente; se ha determinado, para cada sistema, el lapso durante el cual estuvo activo cada evento. Este rango de edades se obtuvo analizando para cada falla, cual es la roca más joven que no esta afectada (edad mínima) y, si es el caso, la edad de una unidad sincrónica con la deformación.

La edad de cada evento se estimó analizando la información de varias fallas contemporáneas en cada sistema (Tabla 2). Nótese que para los eventos más jóvenes no hay un marcador de edad mínima debido a que no hay rocas volcánicas sepultando fallas. Esto quiere decir que sólo se tiene un argumento ambiguo para establecer varios eventos. Sin embargo la migración de volcanismo y su relación con la deformación (explicada adelante) y la diferencia en la morfología de los escarpes permiten hacer una separación en eventos discretos (Alaniz-Álvarez, et al 2001).

Se ha determinado el rango de cuatro eventos extensionales y compresionales desde el Oligoceno hasta el reciente y se ha comparado con los eventos propuestos para la mesa central por Alaniz-Alvarez et al 2001 (Tabla 2).

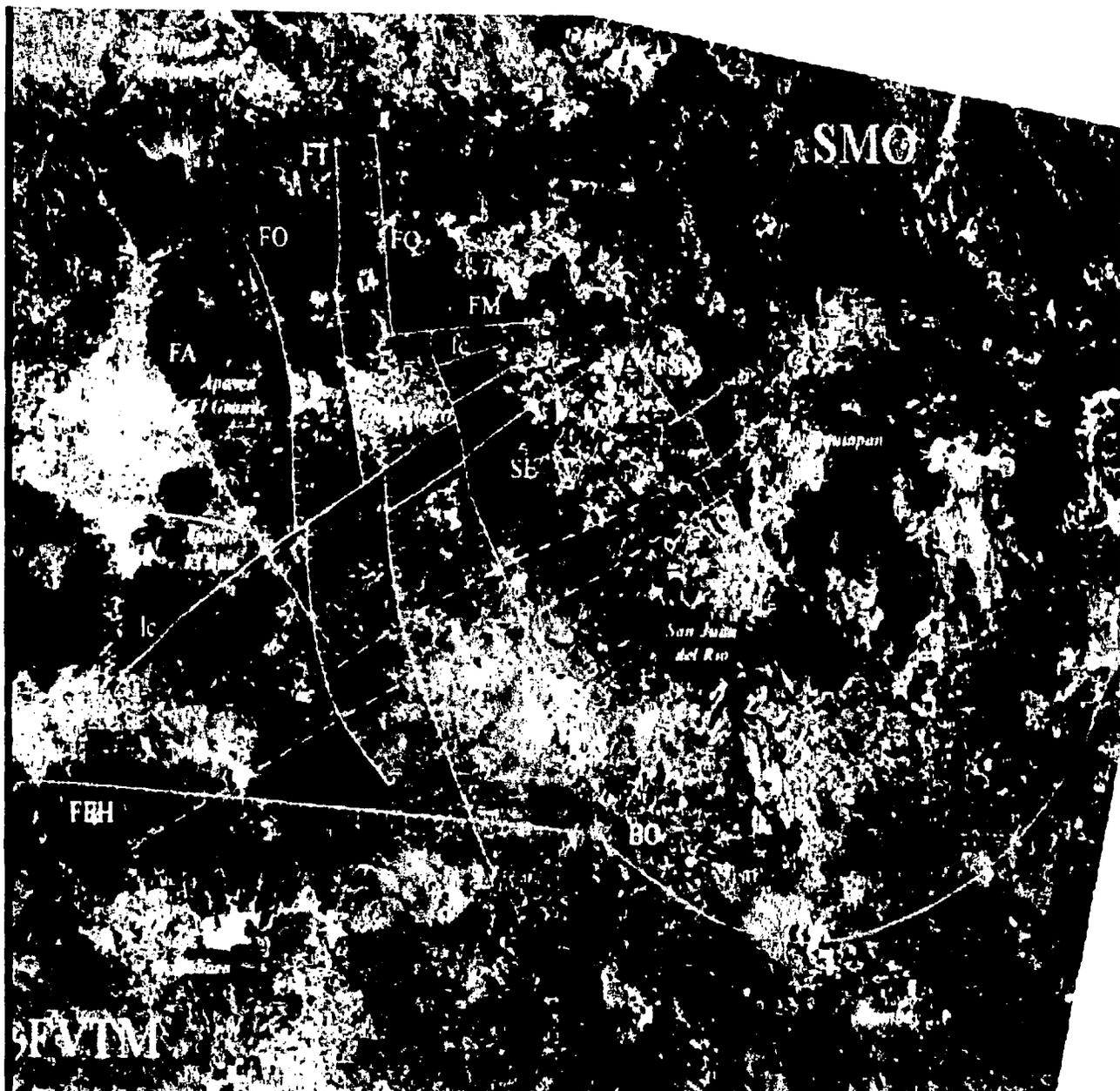


Figura 6. Imagen Land-Sat donde se muestran los principales sistemas de fallas del área. Macías, 2002

Nombre de la Falla	Edad (Ma)			Desplazamiento vertical (m)	Rumbo	Longitud (km)
	Oligoceno	12-9	7-5 <5			
	Sistema			San Miguel de Allende	Taxco	
S. de Enmedio	x			50-70*	NW	40
Q. Norte		x		>100	NW	10-40*
Q. Centro			7.0 -5	50	NW	15
Q. Sur				<5.3	N22° W	25.5
Tlacote			x	110	N16°W	20
Obrajuelo			x	100	N-NW	27
Apaseo		x		50	N35°W	
	Sistema			Chapala Tula		
Cañada				x	E-W	8
Menchaca				x	60 E-W	9
Corregidora				x	90 N70°W	25*
Huimilpan				x	50-100* N80°W	20*

Tabla 2. Edad aproximada de las fallas más importantes del área de estudio. Alaniz-Alvarez et al 2001, geofísica de exploración guysa. Se utilizó X cuando la edad de actividad se infiere por correlación litoestratigráfica. * estructura parcialmente inferida. Nótese que algunas fallas tienen más de una fase de actividad.

III.4.1 Evento D 1 (Extensional).

Durante el Oligoceno ocurrió un evento extensional cercano a los 30 Ma, el cual es inferido por el lineamiento con dirección NW. Se infiere que las fallas Querétaro norte y Sierra de Enmedio tuvieron desplazamientos hectométricos durante este evento, es correlacionable con el evento principal de la Mesa Central ocurrido entre 30 y 27 Ma, que también tuvo desplazamientos considerables (Alaniz-Álvarez et al 2001). La estructura generada debió ser un arreglo de horst y graben formado por las fallas San Miguel de Allende, Querétaro Norte y la Sierra de Enmedio (Figura 7).

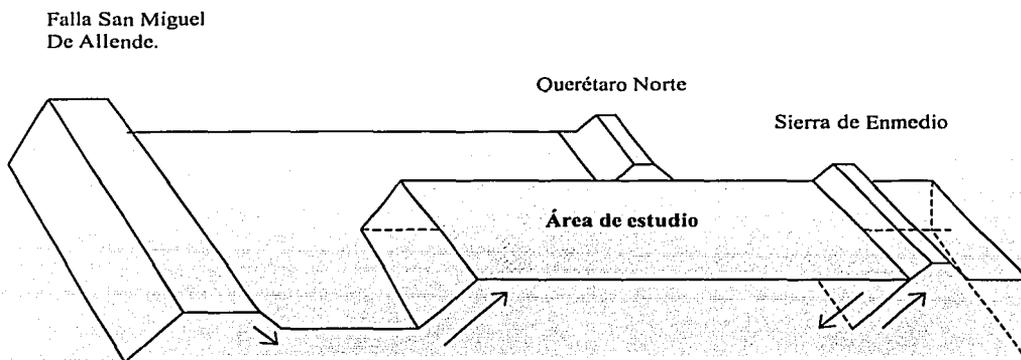


Figura 7. Bloque diagramático de la estructura originada durante el evento D1

III.4.2 Evento D 2.

De acuerdo con el análisis no hubo deformación entre los 24 y 12 Ma. La edad del evento D2 está ubicado entre los 12 y 9 Ma; se determinó por el desplazamiento de los primeros productos de los volcanes Palo Huerfano, La Joya y San Pedro, estructuras volcánicas que se encuentran fuera del área de estudio. El volcán La Joya está localizado a 20 kilómetros al NNW de la ciudad de Querétaro, sobre la prolongación del sistema de fallas San Miguel de Allende-Taxco, entre Santa Rosa de Jáuregui Querétaro y San Miguel de Allende, Guanajuato. Los Volcanes Palo Huérfano y San Pedro también se encuentran al norte del área de estudio cerca del Volcán la Joya en el estado de Guanajuato (Valdéz-Moreno, Aguirre-Díaz y López-Martínez et al 1998), estos se están fracturados o ligeramente desplazados. Se infiere que la falla Querétaro Norte también se activó durante este evento ya que desplaza andesitas presumiblemente del Mioceno Medio.

La morfología de los escarpes sugiere que la mitad norte de la región de estudio se activó durante el evento D2, pero la mitad sur registra un evento más reciente. En la tabla 2 se muestra que los dos sistemas fueron activados durante este evento, aunque la deformación en el sistema NW-SE fue mínima ya que sólo se observan fallas menores.

Las fallas San Miguel y Querétaro Norte tuvieron desplazamiento de varias decenas de metros. La estructura N-S de horst y graben y el mayor desplazamiento en estructuras con esa dirección sugiere que la componente mayor de la extensión seguía siendo ~E-W, similar al del evento oligocénico.

III.4.3 Evento D 3.

El evento D3 se ubica posterior a los 7.5 Ma, es responsable del movimiento de las fallas N-S Apaseo, Obrajuelo, Tlacote y Querétaro Centro cortan basaltos de 7.5 Ma. La Falla Querétaro actuó como falla sintética y las fallas Obrajuelo y Talcote actuaron como fallas antitéticas. Durante este evento se emplazó el volcanismo máfico principalmente fisural, del Mioceno tardío. Esta deformación se concentró en la parte central del área de estudio (Figura 8). La falla San Miguel de Allende no se activó mostrando que la deformación migró hacia el oriente hacia el sistema de fallas de Querétaro. Las fallas N-S tuvieron un desplazamiento uniforme de 80-100 m.

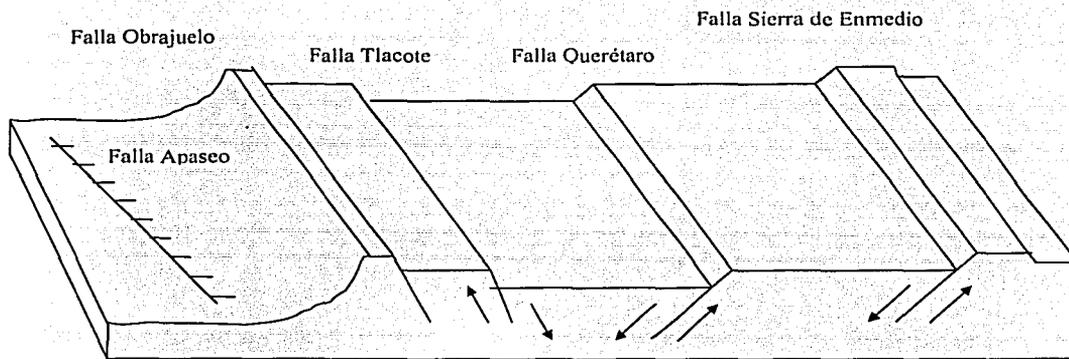


Figura 8. Bloque diagramático que muestra la estructura formada durante el evento D3.

III.4.4 Evento D4 (Compresivo).

El evento D4 ocurrió después de 5.6 Ma y probablemente hasta el reciente. El Volcán Cimatario es cortado por las fallas Corregidora y Querétaro Sur, terminando ésta a su vez en la

falla Huimilpan. El desplazamiento vertical máximo de la falla Querétaro Sur y de la Falla Corregidora es de 100 m. Este evento se ubica en la parte central del área de estudio y corresponde típicamente a la deformación del centro de la Faja Volcánica Transmexicana en el sistema Chapala-Tula con extensión ~N-S (Figura 9). Sincrónicamente con este evento de deformación, ocurrió un evento de volcanismo poligenético emplazado a lo largo de la traza del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: el volcán Cimatario, Cerro Grande, la Caldera de Amealco, volcán Altamirano volcán Ñado, volcán Temascalcingo, Cerro La Guadalupana, Volcán San Antonio y Nevado de Toluca, (Alaniz-Álvarez et al 2001).

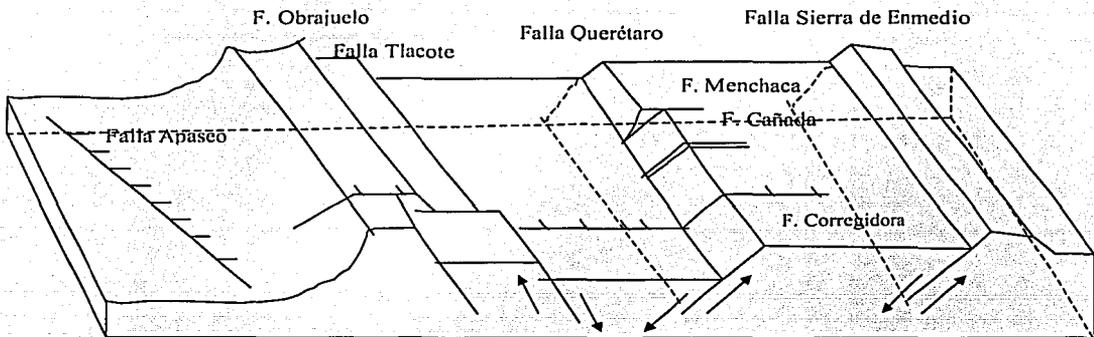


Figura 9. Bloque diagramático donde se observa la estructura formada durante el evento D4.

Se concluye que el sistema NE-SW empieza a ser el sistema predominante a partir de los 5.6 Ma y que desde el Mioceno hay una tendencia de rejuvenecimiento gradual hacia el SE tanto del volcanismo como del fallamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV Hidrología Subterránea.

IV.1 Recarga y descarga de los acuíferos.

En condiciones naturales la recarga a los acuíferos debe haberse generado al infiltrarse la lluvia por los cauces naturales de río San Juan y el Arroyo Chichimequillas del área de Amascala; del río Querétaro al centro; de los escurrimientos provenientes de las zonas de Santa Rosa de Jáuregui y Tlacote el Bajo por el norte y Huimilpan por el sur. Estos colectores eran alimentados a su vez, por cauces tributarios que juntaban el escurrimiento de la lluvia ocurrida en las partes altas y después se infiltraba en las fracturas.

Una vez infiltrada por las fracturas, se movía con una componente preponderantemente vertical hasta alcanzar las zonas saturadas donde debe haberse dado origen a numerosos manantiales a diferentes alturas. Estos manantiales generaban a su vez otros escurrimientos superficiales que eventualmente alcanzaban las planicies. En éstas, el agua infiltrada por los cauces naturales, más la de lluvia que precipitaba en sus extensas superficies y que alcanzaba el nivel freático, que en condiciones naturales se encontraba cercano a la superficie, se desplazaba ya como flujo subterráneo horizontal a través de los materiales granulares que rellenaban las fosas tectónicas del Valle de Amascala y San Juan del Río, donde las condiciones de flujo inicialmente se presentaban de la Sierra de Escobedo a la altura del parte aguas bifurcándose en dos direcciones, una hacia el sureste rumbo a San Juan del Río y la otra hacia La Cañada con dirección al de Querétaro y de este al de los Apaseos (Apaseo el Grande y Apaseo el Alto) en Guanajuato.

Este mecanismo de descarga subterránea está controlado tanto por las elevaciones de los valles, 1950 msnm de la planicie de San Juan del Río; 1800 msnm de la de Querétaro y de 1750 msnm de la los Apaseos, así como por el rasgo estructural de la falla Cañada sobre la que escurría el Río Querétaro entre otras. Las direcciones preferenciales de flujo subterráneo se presentan de la siguiente forma: tomado como referencia San Juan del Río se dirigen hacia el Noroeste hacia Pedro Escobedo y La Cañada pasando por esta hacia el valle de Querétaro; el flujo actuando de manera regional continúa en dirección Oeste atravesando toda la cuenca en dirección al estado de Guanajuato.

Otro mecanismo de descarga estaba constituido por los niveles freáticos más someros que en las partes bajas de las planicies daba lugar a cuerpos de agua superficiales como la del Salitre en los límites con el Estado de Guanajuato. En esas condiciones originales, el flujo establecido, la recarga total natural era igual a la descarga subterránea que tenía lugar en el extremo occidental del Valle de Querétaro, más la que se presentaba por evaporación en esta misma zona.

La explotación del agua subterránea iniciada, tal vez, a principios de la década de 1940, y su continuación en las siguientes décadas modificó los mecanismos de recarga. El descenso de los niveles freáticos provocó que los manantiales que existían en las partes altas se agotarán y se diera el cambio de régimen de escurrimiento. Esto ocasionó que el escurrimiento e infiltración se limitara únicamente a épocas de lluvias, y por consiguiente la tasa de recarga varió con el tiempo.

Paralelamente a este fenómeno, el descenso del nivel freático en los materiales sueltos recientes, indujo la manifestación de semiconfinamientos en áreas donde los niveles de agua alcanzaron la intercalación de estratos lacustres más antiguos y de diferente permeabilidad, lo que modificó el régimen de acuífero libre a libre-semiconfinado.

Afectaciones similares tuvieron lugar en los extensos afloramientos de rocas volcánicas fracturadas. El agua infiltrada recorría mayores trayectos en el sentido vertical conforme se profundizaban los niveles hasta alcanzar la zona de saturación; una vez en esta, el sentido de flujo cambió su componente a horizontal para alimentar a través de las fracturas en los fondos de las fosa a los volcanoclásticos y lacustres de la cuenca de Querétaro.

Al sobrepasar las extracciones por bombeo al monto de la recarga natural, el agua tomada del almacenamiento modificó la red de flujo natural: el escurrimiento subterráneo comenzó a converger a las depresiones piezométricas e importantes caudales de esta naturaleza fueron interceptados en su trayectoria a las salidas naturales.

IV.2 Unidades Geohidrológicas.

En estudios anteriores a éste trabajo, específicamente los realizados por Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V (1991 y 1993), agruparon siete unidades hidrogeológicas, para este trabajo se reconocieron tres unidades principalmente, en las que se agrupan grandes paquetes con características de génesis e hidráulicas similares, éstas se describen a continuación.

IV.2.1 UNIDAD GEOHIDROLOGICA I Acuíferos de extensión regional compuesta por depósitos granulares clásticos de origen ígneo y vulcanolacustres intercalados con coladas de lavas e ignimbritas

Esta unidad de relleno de fosas se localiza prácticamente dentro de toda el área de estudio (figura 2), en la Cuenca de San Juan del Río su mayor amplitud corresponde desde San Juan del Río hasta Pedro Escobedo, tiene una orientación Noreste-Sureste. El espesor de esta unidad en esta cuenca varía de 150-200 y en otros sitios es de 325 m; en el Valle de Querétaro se encuentra principalmente en toda la planicie y se extiende hasta el estado de Guanajuato; el espesor de esta unidad hidrogeológica es variable, va desde los 400 a los 600 m.

Funcionamiento Hidráulico.

Esta unidad funciona a nivel regional como un acuífero en medios granulares, constituido principalmente por tobas limoarenosas y pumiciticas de tamaño variable, intercalado con coladas de lava e ignimbritas. Mediante pruebas de bombeo realizadas por Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A de C.V (1991), y algunas interpretaciones hechas anteriormente, se determinó que esta unidad funciona como un acuífero libre a semiconfinado.

Los mecanismos de recarga de esta unidad son controladas por el flujo regional proveniente de la Cuenca de San Juan del Río, donde las entradas subterráneas horizontales principales provienen de la zona de la caldera de Amealco, aunque una entrada importante a esta unidad es a través de la fractura Cañada donde el fracturamiento vertical que presentan las ignimbritas y basalto lajeados permiten el libre paso del agua por estas unidades.

Por el sur se manifiesta un flujo profundo procedente de la sierra de Huimilpan que desemboca en Villa Corregidora. Por el norte la recarga subterránea proviene del Valle de Buena Vista con dos entradas; Jurica y Tlacote el Bajo Con direcciones N-S para ambas localidades (Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V, 1991).

La recarga superficial se lleva a cabo a través de retornos de riego e infiltración de aguas pluviales en los depósitos aluviales. A través de esta unidad se lleva a cabo la descarga subterránea hacia la cuenca de los Apaseos mediante el estrechamiento estructural y/o fallas activas. La principal descarga de agua se lleva a cabo mediante la explotación de 597 pozos en el Valle de San Juan del Río, 500 pozos existentes en el Valle de Querétaro y 978 pozos en los Apaseos, además de algunos manantiales termales .

IV.2.2 UNIDAD GEOHIDROLÓGICA II. Acuíferos regionales en rocas con una densidad de fracturamiento alta.

Esta unidad tiene una amplia distribución en la mayor parte del área de estudio. En la cuenca de San Juan del Río esta constituido por depósitos tobáceos de composición ácida, intercaladas con rocas ignimbríticas y derrames basálticos; su distribución abarca desde frentes rocosos en las zonas altas que componen en parte la Sierra de Colón, Sierra de Enmedio, Tequisquiapan y Sierra de San Juan del Río, hasta planicies, principalmente en la parte sur, desde la presa Constitución de 1917 hasta San Juan del Río y en la Sierra de Enmedio. En la Cuenca de Querétaro esta compuesta por tobas, basaltos y brechas volcánicas estas últimas unidades con una densidad de fracturamiento muy alta, favoreciendo el drenaje vertical; al igual que en la cuenca de San Juan del Río, en esta parte la unidad tiene una amplia distribución, alrededor del 70% de la superficie de la cuenca (Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V, 1991), ocupando desniveles topográficos abruptos, mesetas y en menor cantidad aparatos volcánicos. Para la cuenca de los Apaseos esta unidad se constituye principalmente por basaltos fracturados que favorecen la infiltración del agua y también esta formada por depósitos vulcanoclásticos principalmente en las estribaciones de las sierras y lomeríos.

Funcionamiento Hidráulico.

Esta unidad funciona como elemento de recarga, en general en las tres Cuencas; las fracturas presentes en la litología permite que el agua se infiltre fácilmente y sin obstáculos de forma vertical abasteciendo de agua a la Unidad Geohidrológica I. En la Cuenca de San Juan del Río las entradas de agua subterráneas horizontales se originan en la Caldera de Amecalco (Figura 6). A partir de su parteaguas norte en donde las fuertes precipitaciones pluviales forman grandes corrientes superficiales cuyas infiltraciones cargan el flujo subterráneo en dirección a San Juan del Río y a la presa Constitución de 1917, el flujo actuando de manera regional se dirige hacia la Cuenca de Querétaro.

Otra recarga importante proviene de la Caldera Huichapan (Figura 6), su comportamiento hidráulico tiene la misma dirección de flujo. La recarga superficial se lleva a cabo mediante retornos de riego e infiltraciones de las corrientes superficiales de varios arroyos existentes en el área y de las fugas de los almacenamientos de la presa Constitución de 1917 y presa la Llave; para la Cuenca de San Juan del Río corresponde a un acuífero de muy baja productividad con niveles estáticos muy profundos (mayores a 200 m) y gastos bajos que no mejoran aún con mayor profundidad en los pozos. En el caso de la Cuenca de Querétaro el nivel estático se encuentra alrededor de los 120-180 m, para la cuenca de Los Apaseos la profundidad del nivel estático van de 30 m en la parte occidental de la cuenca, en el resto de la cuenca la profundidad es mayor pero no sobrepasa los 100 m.

IV.2.3 UNIDAD GEOHIDROLÓGICA III. Unidad compuesta principalmente por rocas impermeables.

Esta unidad es quien controla el arreglo estructural del subsuelo formando una serie de bloques elevados y hundidos. Esta compuesta por andesita alteradas, un cuerpo intrusivo de composición granítica, calizas y lutitas. En la Cuenca de San Juan del Río se encuentra en la parte norte, en la Cuenca de Querétaro en los poblados de Talcote el Bajo en donde las andesitas alteradas actúan como barrera impermeable y el Nabo donde estas andesitas se encuentran hasta el basamento, en Juriquilla se encuentra el cuerpo intrusivo de composición granítica que también actúa como barrera impermeable.

Funcionamiento hidrogeológico.

En la superficie actúa como barrea impermeable y en subsuelo actúa como basamento impermeable.

IV.3 Balance de aguas subterráneas.

Dentro de los límites fijados para el área de este estudio, la cuenca de San Juan del Río, el Valle de Querétaro y los Apeseos tienen las fronteras naturales que lo caracterizan como una cuenca hidrográfica e hidrogeológica integral; los componentes de recarga y descarga pueden ser estimados en su totalidad así como las dimensiones del acuífero y el parámetro que acota el volumen de agua subterránea almacenada.

IV.3.1 Ecuación de balance de aguas subterráneas.

Una ecuación de balance expresa generalmente un cambio de masa de agua almacenada en un sistema acuífero para un determinado volumen de recarga y descarga, en un determinado tiempo, es decir, relaciona los parámetros que intervienen en el funcionamiento del acuífero, por eso es necesario plantear una ecuación que relacione dichos cambios; la ecuación se puede dar por la siguiente expresión.

Para la cuenca de San Juan Río.

$$(E_s + R_v + R_r) - (S_s + B) = \Delta(v)S$$

Donde $(E_s + R_v + R_r)$ son los volúmenes de entrada al sistema (E):

E_s Entradas subterráneas

R_v Recarga vertical

R_r Recarga por retorno de riego debido a la zona No. 23.

$(S_s + B)$ son las salidas del sistema S:

S_s Salidas Subterráneas (flujo intermedio) hacia la CQ.

B Extracción por bombeo

Almacenamiento (ΔS)

$\Delta(v)$ Cambio de almacenamiento

S Coeficiente de almacenamiento.

Para la Cuenca de Querétaro la ecuación correspondiente para la evaluación de aguas subterráneas es la siguiente:

$$Es + R - B - Ss = \Delta (V) S.$$

Donde:

Es Entradas Subterráneas.

R Recarga Vertical.

B Extracción por bombeo de pozos.

Ss Salidas Subterráneas.

$\Delta (V)$ Volumen Drenado del Almacenamiento.

S Coeficiente de almacenamiento

Todos estos componentes fueron medidos o calculados para un área de 139 Km², como puede observarse las dos ecuaciones son iguales a acepción del parámetro Rr que es la recarga originada por el distrito de riego No. 23, Para la CA, la ecuación que se aplicó es la siguiente: $Es + Rv - B = \Delta VS$. En esta ecuación, obsérvese que no hay salidas subterráneas laterales (flujo intermedio) hacia cuencas aledañas.

IV.3.2 Balance de aguas subterráneas

De la información obtenida de las ecuaciones de balance se obtuvo la siguiente información (Tabla 3).

Cuenca	Área de Balance (Km ²)	Recarga Total (Mm ³)	Descarga Total (Mm ³)	Número de Pozos	Número de Manantiales	Profundidad del nivel Estático (m)
C.S.J.R	604	346.9	320	597	0	100-150
C.Q	139.4	67.5	119.182	500	0	100
C.A	385.85	204.4	199.9	978	400	0-30-100
TOTAL	1129.25	618.8	339.082	275	400	

Tabla 3. Balance de aguas subterráneas, información obtenida de los estudios hechos por Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V (1991 y 1993) y LESSER y Asociados S.A de C.V 1995.

De la Cuenca de San Juan del Río la recarga se debe principalmente a:

Entradas subterráneas 83.30 Mm³

Retornos por riego 78.50 Mm³

Recarga vertical 185.10 Mm³

Las salidas:

Bombeo 300 Mm³

Flujo subterráneo	20 Mm ³
-------------------	--------------------

Con respecto a la Cuenca de Querétaro la recarga se debe principalmente a:

Entradas de flujo subterráneo.

-Huimilpan	6.7 Mm ³
-Cañada	24.4 Mm ³
-Buena Vista	1.4 Mm ³
Recarga vertical	34.0 Mm ³

Descargas:

Extracción por bombeo	90.182 Mm ³
Salidas subterráneas	29 Mm ³

La Cuenca de Los Apascos:

Entradas subterráneas

-Flujo subterráneo	129.8 Mm ³
-flujo regional ascendente	49.7 Mm ³
Recarga vertical	224.9 Mm ³

Descargas:

Bombeo	199.9 Mm ³
--------	-----------------------

El modelo utilizado fue el Plasm que corresponde a un modelo de flujo subterráneo elaborado originalmente por Prickett y Lonquist 1971 y 1988, en su versión modificada por el Ing. Ulrich Hunsberg de la Comisión Nacional del Agua.

Este, es un modelo bidimensional del flujo para acuíferos libres, confinados o semiconfinados, en medios heterogéneos, que acepta variaciones en los caudales de extracción respecto al tiempo; se le puede incluir también recarga natural o artificial. (Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V 1991, 1993 y LESSER y Asociados S.A de C.V 1995).

V Cuenca Unidad

V. 1 Concepto de continuidad Hidráulica.

La continuidad hidráulica es una propiedad física de los cuerpos rocosos. Esta propiedad se cuantifica como la relación entre el cambio inducido en la presión intersticial en un punto de observación respecto al producido en el punto de origen. En este sentido un cuerpo rocoso se considera continuo hidráulicamente a una cierta escala de tiempo, si un cambio de presión en cualquiera de sus puntos puede producir un cambio en cualquier otro punto, en un intervalo de tiempo que se pueda medir a una escala de tiempo específica.

El comportamiento hidráulico continuo de la roca en grandes cuencas sedimentarias puede estar enmascarado por largas distancias, periodos de observación relativamente cortos y por contrastes bruscos en las propiedades de los fluidos que son sensibles al propio flujo, como son temperatura y composición química. Debido probablemente a estos efectos de enmascaramiento, el concepto de compartimientos hidráulicamente “sellados” en el subsuelo se sigue usando como una hipótesis de trabajo, particularmente en geología petrolera.

El hecho que un cuerpo rocoso sea continuo hidráulicamente se ha establecido independientemente a partir tanto de estudios en acuíferos locales, como evaluaciones regionales de recursos hidráulicos. Las consecuencias naturales principales son: sistemas de flujo de aguas subterráneas extensos, distribución sistemática de materia y calor e interdependencia hidráulica de las distintas áreas de la cuenca.

El reconocimiento de la continuidad hidráulica regional es, por tanto, indispensable para la correcta interpretación de numerosos procesos y fenómenos naturales, así como para la correcta modelación y predicción de los efectos de las tensiones impuestas al régimen de flujo por la naturaleza y el hombre. La continuidad hidráulica es una propiedad relativa que también depende de la distancia entre los puntos de origen y observación, la perturbación en la presión y la conductividad hidráulica/almacenamiento específico de la roca.

V.1.1 Concepto de Cuenca Unidad.

La Cuenca Unidad es una depresión topográfica simétrica con un perfil inclinado y una litología linealmente homogénea (Figura 10). En este modelo ocurren tres diferentes sistemas de flujo; la recarga, zona de tránsito y descarga, estas se caracterizan por flujo descendente, lateral y flujo ascendente respectivamente, así como con sus respectivos patrones de presión de poro, carga hidráulica y gradientes verticales de presión.

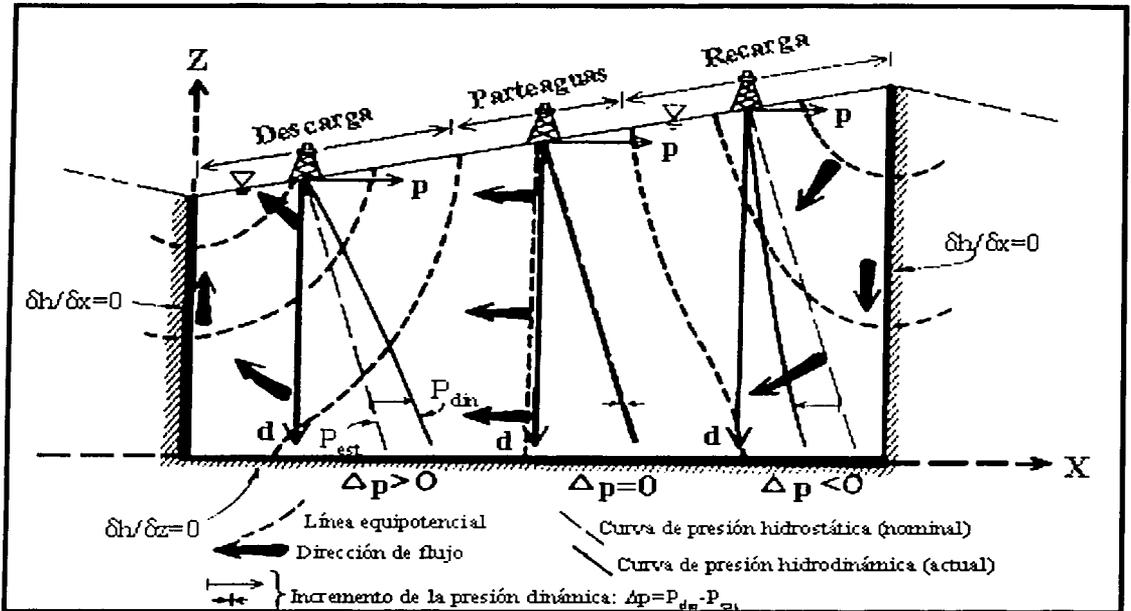


Figura 10 Modelo de Cuenca Unidad, que muestra los patrones de flujo, capacidad de movimiento del fluido y presión de poro, tomada de J. Tóth, Hydrogeology Journal 1995.

En esta cuenca existen tres tipos de flujo subterráneo: local, intermedio y regional (Figura 11), este esquema de flujo representa las características de comportamiento individuales que se manifiestan de distinta forma:

- Niveles piezométricos por debajo o por encima de los valores hidrostáticos según vayamos de las zonas de recarga a la de descarga.

- Contenidos de humedad bajos en las zonas de recarga y altos en la zona de descarga, respecto a los valores que se obtendrían en condiciones naturales considerando precipitación y evaporación.
- Cambios en la concentración aniónica a lo largo del esquema de flujo y en profundidad, pasando de aguas bicarbonatadas a sulfatadas y finalmente cloruradas.
- Anomalías geotérmicas en zonas de flujo vertical.
- Condiciones oxidantes en las zonas de recarga y reductoras en la descarga.

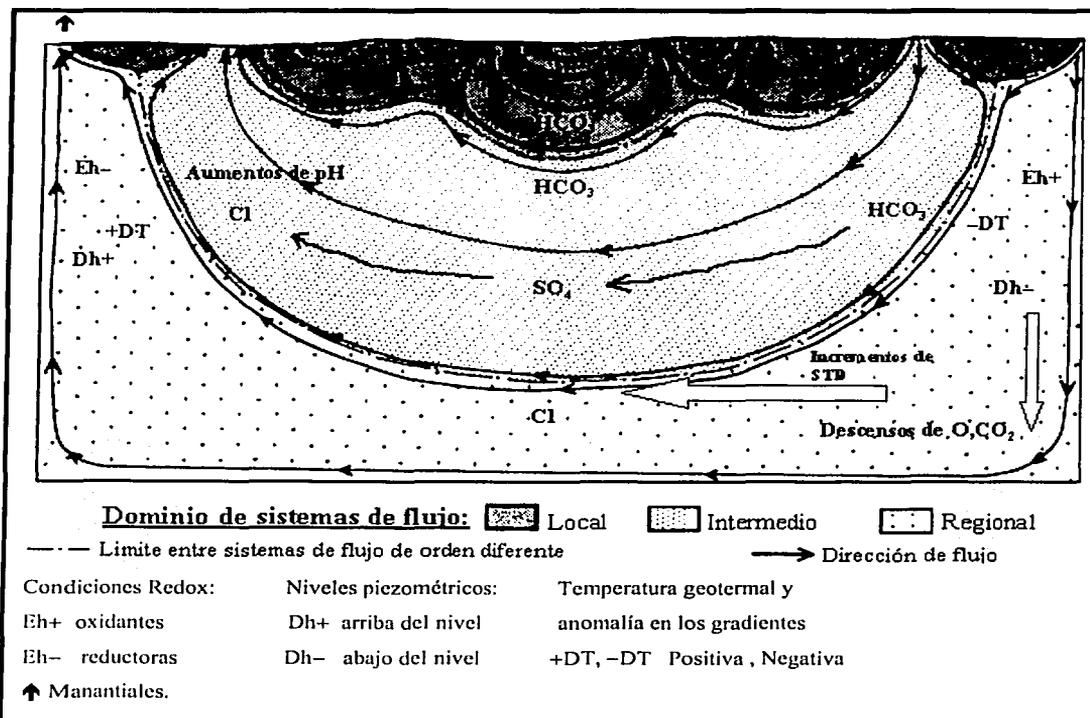


Figura 12 Cuenca Unidad homogénea mostrando los tipos de sistemas de flujo, tomada de József Tóth, Hydrogeology journal 1995.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V.2 Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de la Cuenca Unidad.

Las cuencas y valles que se localizan en la zona de estudio son producto de un ambiente tectónico-volcánico muy activo, característico de la provincia fisiográfica del Faja Volcánica Transmexicano. El desarrollo de una tectónica distensiva, compresiva y tensional con orientaciones preferenciales Noroeste-Sureste, Noreste-Suroeste y Oriente-Poniente, dan origen a la formación de fosas y pilares extensos lineamientos y grandes estructuras volcánicas tipo caldera como Amealco y Huichapan.

La intensa actividad volcánica produjo el relleno de fosas, con gruesos paquetes de material lávico y piroclástico intercalado de diversas composiciones, así como las extensas sierras alineadas alrededor de ellas. De acuerdo con las diferencias litológicas, estructurales y morfológicas que presentan las sierras y los valles se distinguieron las siguientes estructuras: El Valle San Juan del Río es una depresión alineada NW-SE que va de la Ciudad de San Juan del Río a la entrada de la Cañada, compuesta principalmente por depósitos piroclásticos procedentes de la Caldera de Amealco intercalado con algunos derrames de composición básica.

La Cuenca de Querétaro es el resultado del hundimiento producido por un sistema de fallamientos escalonados por esfuerzos distensivos dirigidos hacia el poniente y oriente respectivamente, esta conformado en los bloques altos por una alternancia de efusiones lávicas de naturaleza andesítica y basáltica con sus productos piroclásticos asociados, en las fosas; el relleno lo constituye una potente acumulación de sedimentos vulcanolacustres intercalados con derrames de lavas básicas de muy diversos espesores y que en ambos casos constituyen los embalses subterráneos.

El espesor de los rellenos volcánicos varía para las tres cuencas, para el caso de San Juan del Río son de 200 a 500 metros, la Cuenca de Querétaro el espesor varía 500 ± 100 m. La base del acuífero es similar en composición y variable profundidad para cada cuenca, ya que para la cuenca de San Juan del Río se considera andesítico principalmente, sobre el cual descansan depósitos ignimbríticos a una profundidad de 300 metros en promedio y en algunas

zonas hasta 500 metros como en las inmediaciones de San Juan del Río. La cuenca de Querétaro tiene las mismas características pero es de un espesor mayor.

En la Cuenca de los Apaseos las rocas volcánicas que constituyen la elevaciones topográficas, corresponden generalmente a derrames lávicos asociados con brechas y tobas de composición basálticas y en menor proporción riolítica, en los valles, los materiales se presentan intercalados con lavas de tipo basáltico, así como con sedimentos lacustres y cenizas volcánicas depositadas en ambientes lagunares.

El acuífero se encuentra circundado por elevaciones topográficas a partir de las cuales se establece un flujo subterráneo hacia el centro de la cuenca, además de un flujo subterráneo ascendente regional que proviene de la cuenca de San Juan del Río. Las zonas de sierras que rodean a los tres valles, se consideran como barreras o fronteras de carácter semipermeable y en ocasiones con flujo local, ya que sus características litológicas e hidráulicas los definen como zonas de recarga pero no como de almacenamiento de acuífero o medio de flujo.

Las tres cuencas se encuentran alojadas en un extenso valle de aproximadamente 96 kilómetros de largo desde la falla Sierra de Enmedio en el estado de Querétaro hasta el Río La Laja en el estado de Guanajuato y con un ancho promedio de 30 kilómetros. Abarcando una área de 2880 Km² de los cuales 1129.25 km² corresponden al área de balance.

Las fuentes de recarga son la producida por la lluvia que se infiltra de manera vertical, por retornos de riego así como por el flujo regional que circula a más de 500 metros de profundidad. La descarga se lleva a cabo principalmente mediante la operación de pozos. En la Cuenca de San Juan del Río se encuentran operando 297 pozos, en la cuenca de Querétaro 500 pozos y en los Apaseos un total de 978; pozos, en esta cuenca también existe descarga mediante manantiales termales que en conjunto forman alrededor de 400, estos se encuentran distribuidos en la falla Obrajuelo y en el área de La Laguna el Salitre donde se localizan la mayoría de los manantiales, el conteo que se realizó fue de 350 pero se estima que pueden existir más ya que la zona en algunas partes se encuentra pantanosa y cubierta de pastizales muy espesos que impiden el paso; la temperatura de estos es muy variable, en algunos se registró 60°C y en los más activos alcanzo los 88°C, también existen manantiales permanentes

en las cercanías del poblado de Ixtla así como en el poblado de Apasco el Alto (Fotografías 15, 16, 17, y 18).



Fotografía 15. Manantial activo NIDO III, se localiza en el bloque del alto de la falla Obrajuelo, cerca de la Laguna el Salitre, la temperatura registrada fue de 88°C.



Fotografía 16. Manantial (NIDO II) situado en la misma zona, este presenta periodos de calma y actividad, la temperatura registrada en periodo de de reposo fue de 77° C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 17. En esta fotografía se puede observar al mismo manantial pero en su fase activa (NIDO II), la temperatura registrada fue de 86°C.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotografía 18. Manantial localizado en las cercanías del poblado de Ixtla en el Rancho de Los Saucedo con un caudal permanente de 5 lps y una temperatura de 59°C.

V.2.1 Fundamento de la Propuesta de Continuidad Hidráulica en la Cuenca Unidad.

Como ya se mencionó, el modelo de Cuenca Unidad debe tener áreas que funcionen como recarga y descarga; para la zona de estudio se propone que el área de recarga del acuífero sea la correspondiente a la Cuenca de San Juan del Río, ya que en esta zona las cargas hidráulicas disminuyen conforme aumentan las profundidades totales de los pozos. Para comprobar esto se graficaron las profundidades del nivel estático de los pozos contra las profundidades totales de estos (Figura 12) de está se puede observar que la mayoría de los pozos se encuentran distribuidos en el área de recarga, unos cuantos en la zona de transición - esto puede deberse a la recuperación del nivel de flujo debido a la cercanías de estos con la presa Constitución de 1917 y La Llave- y ningún pozo en la zona de descarga.

La precipitación es un factor que influye directamente en la disposición de volúmenes de escurrimiento y en la recarga del acuífero; del volumen almacenado en presas una porción importante se infiltra al acuífero, otra fuente de recarga importante la presenta la infraestructura hidráulica del distrito de riego No. 23, con un área de 10,000 has, pero la recarga más importante se debe a la que se origina al sur de la cuenca, en el Bordo Orográfico Calderas de Amealco-Huichapan (Héctor L. Macías, 2002) (Figura 6), esta estructura abarca una superficie de más de 1000 Km², la infiltración tiene lugar en ignimbritas fracturadas y sedimentos vulcanoclásticos.

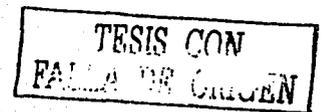
La zona de transición de la Cuenca Unidad corresponde al Valle de Querétaro donde el flujo actúa de manera lateral, para comprobar esto se realizó la gráfica de profundidades de pozos contra nivel estático del agua (Figura 13). Del resultado obtenido se puede observar que realmente el flujo actúa de manera lateral, ya que la mayoría de los pozos se encuentran dentro de la zona de transición, muy pocos en la de recarga y ninguno en la zona de descarga.

La figura 14 correspondiente al Valle de Los Apaseos y ésta respectivamente es el área de descarga de la Cuenca Unidad, en la figura puede observarse que existen pozos dentro de la zona de recarga pero estos a menor profundidad con respecto a la Cuenca de San Juan del Río, esto nos indica que el flujo aquí se comporta de forma ascendente como lo establece el

modelo propuesto por József Tóth 1995, también puede observarse que ya existen pozos dentro de la zona de descarga así como en límite entre esta y la de transición, es importante hacer notar que en esta gráfica no se encuentran graficados los 400 manantiales mencionados anteriormente, que son la evidencia más clara del flujo ascendente.

De lo observado en estas figuras se concluye que el comportamiento hidráulico del flujo subterráneo cumple con las características de la Cuenca Unidad que definió J. Tóth, ya que el Valle de San Juan del Río actúa como recarga, los niveles piezométricos son relativamente altos y decrecen con la profundidad, de modo que existe un flujo vertical descendente y divergente (Figura 15).

El Valle de Querétaro que es la zona de transición entre los valles de San Juan del Río y los Apaseos; la altura piezométrica apenas varía con la profundidad, las isopiezas son prácticamente verticales y el flujo es predominantemente horizontal (Figura 16). En la zona de descarga se invierte el esquema de flujo, de modo que los niveles piezométricos crecen con la profundidad y el flujo es vertical ascendente y convergente (Figura 15).



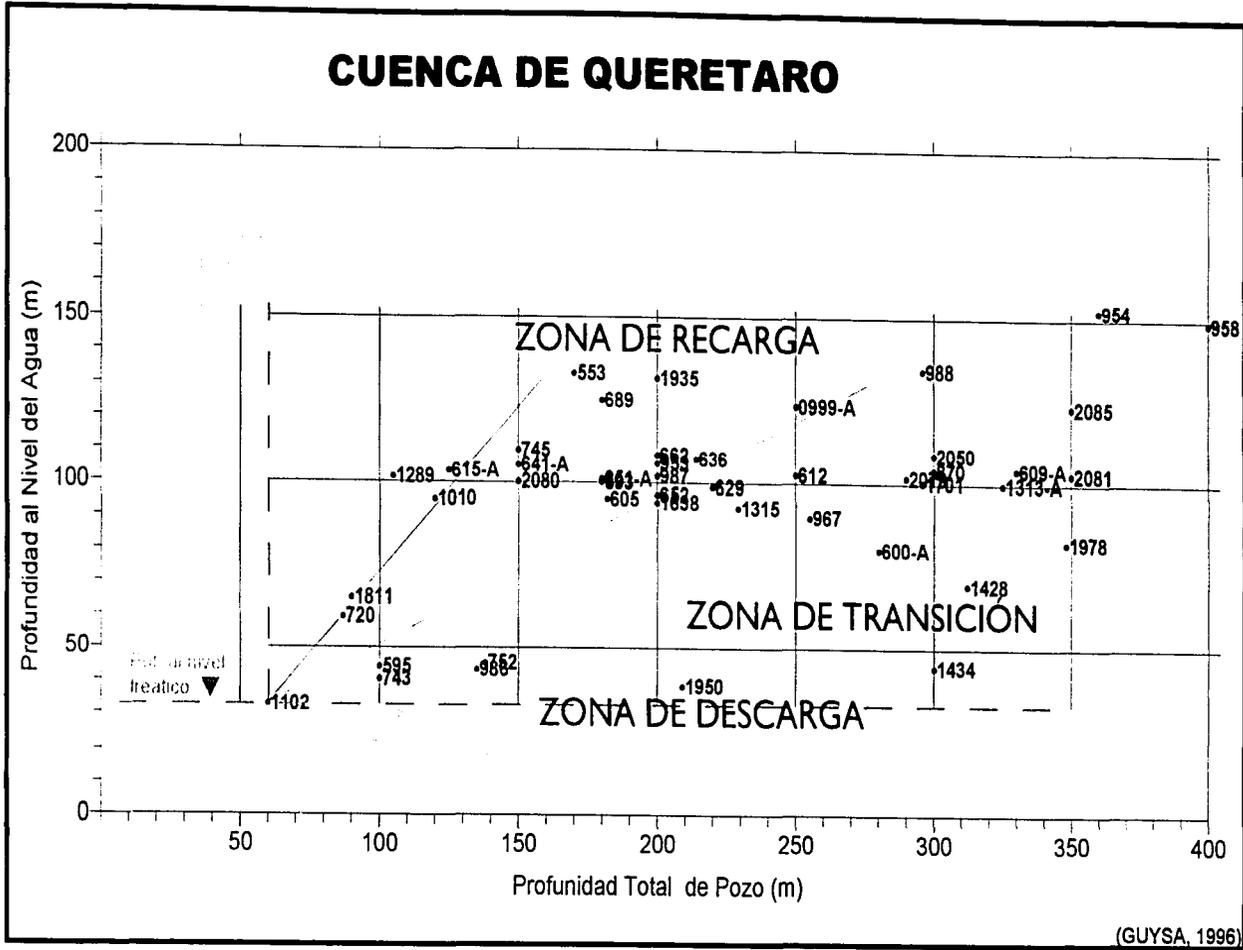


Figura 13. Profundidades del nivel estático de los pozos contra profundidades totales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

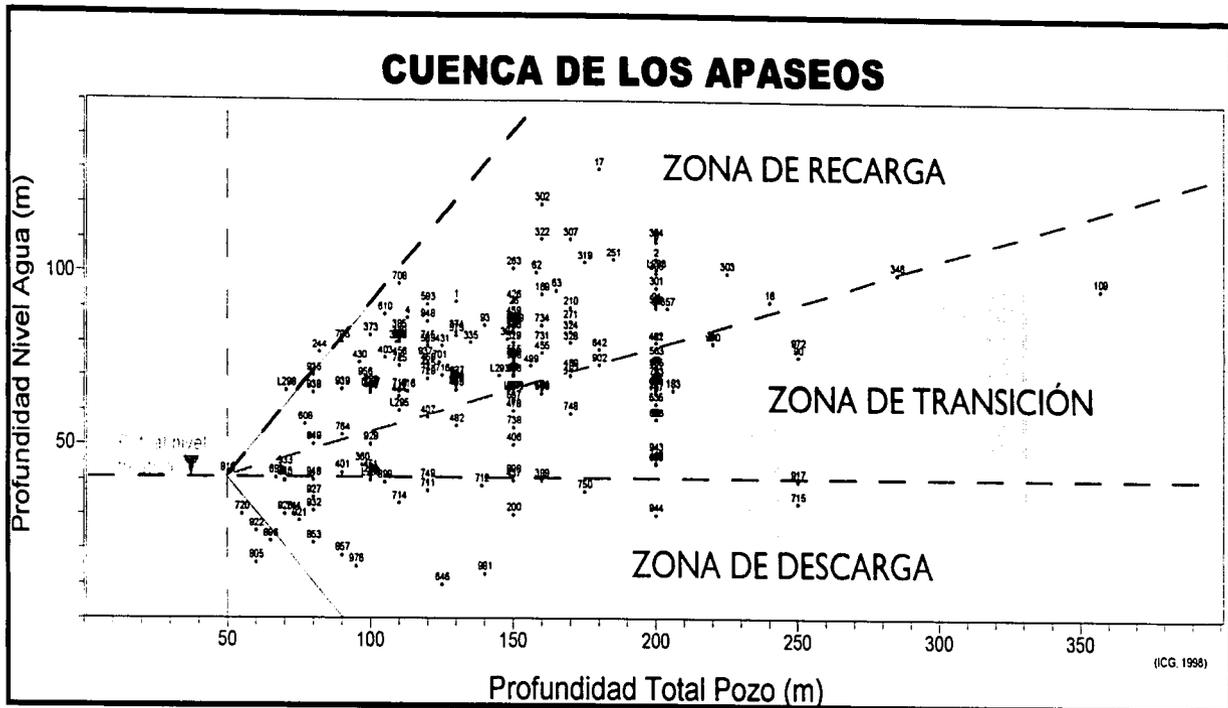


Figura 14. Profundidades del nivel estático de los pozos contra profundidades totales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

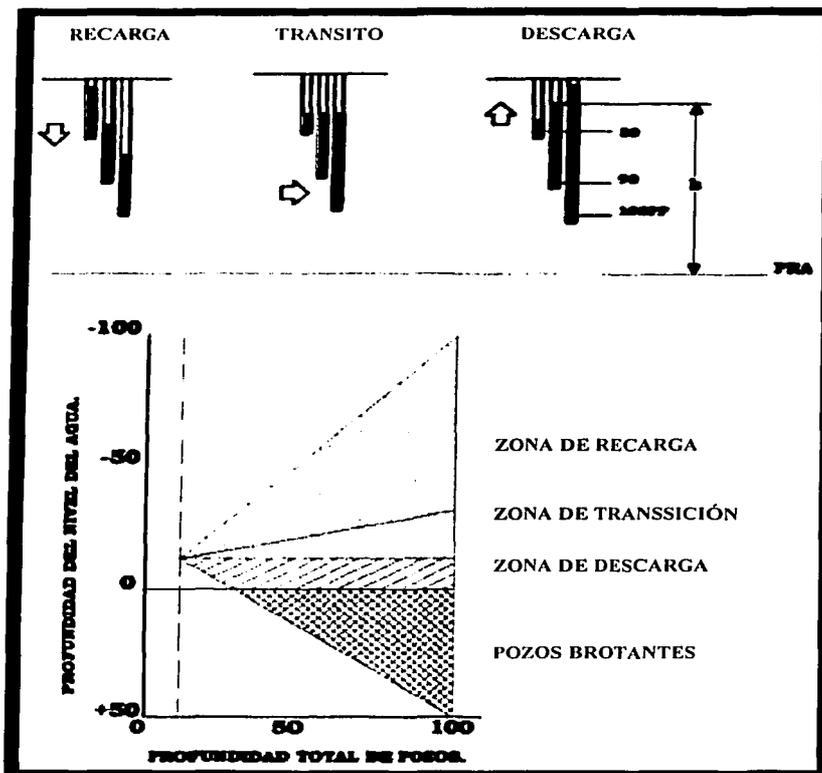


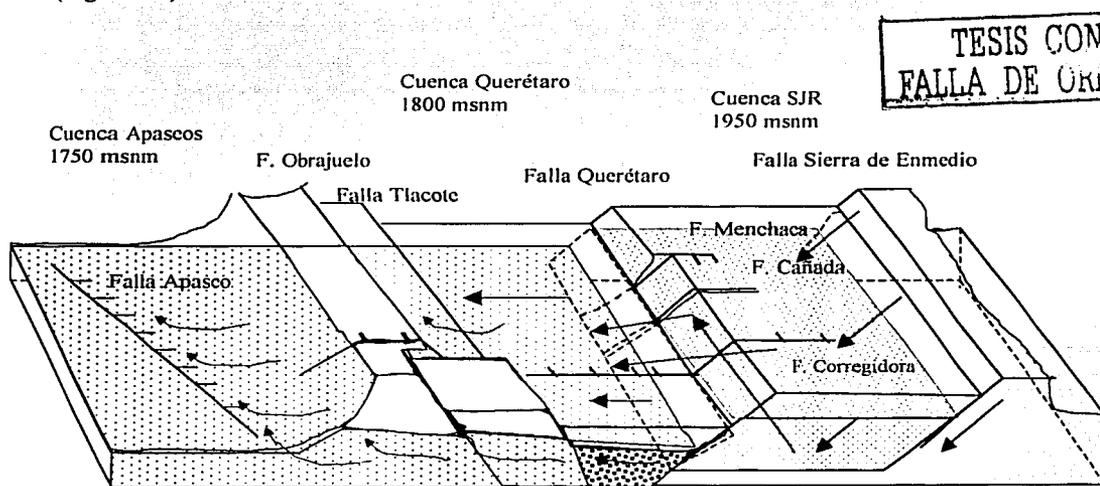
Figura 15. Gráfica en la que se puede observar el flujo descendente de la zona de recarga, el flujo horizontal de la zona de transición y el flujo ascendente de la zona de descarga

V.2. 1 Modelo de Flujo Subterráneo para la Cuenca Unidad.

Como se mencionó anteriormente, en el modelo de Cuenca Unidad se reconocen tres componentes de flujo: local, intermedio y regional. En condiciones iniciales del funcionamiento hidráulico del acuífero existían norias de poca profundidad, en toda la zona de recarga y transición, así como algunos manantiales que actualmente se encuentran secos, estas manifestaciones representaban el flujo local.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El flujo intermedio se origina por las infiltraciones verticales principalmente en el Bordo Orográfico Calderas de Amealco-Huichapan (Macías 2002), llegando a la zona de saturación, donde cambia su dirección de flujo, de vertical a horizontal. Esta zona es la de descarga mediante la explotación de bombeo en la Cuenca de San Juan del Río, este mismo flujo circula e dirección NE hacia el poblado de Pedro Escobedo y hasta llegar a la entrada de la Fractura Cañada que es la entrada de flujo hacia la Cuenca de Querétaro, así como la Falla Corregidora y a la misma Falla Querétaro ya que la litología presenta una alta densidad de fracturamiento que sirven de conducto para el agua en donde circula a través de toda la cuenca y el flujo que no es extraído por bombeo descarga en la Cuenca de los Apaseos (Figura 16).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 16 Bloque diagramático del modelo conceptual de circulación de flujo a través de fallas y material vulcano sedimentario en las tres cuencas.

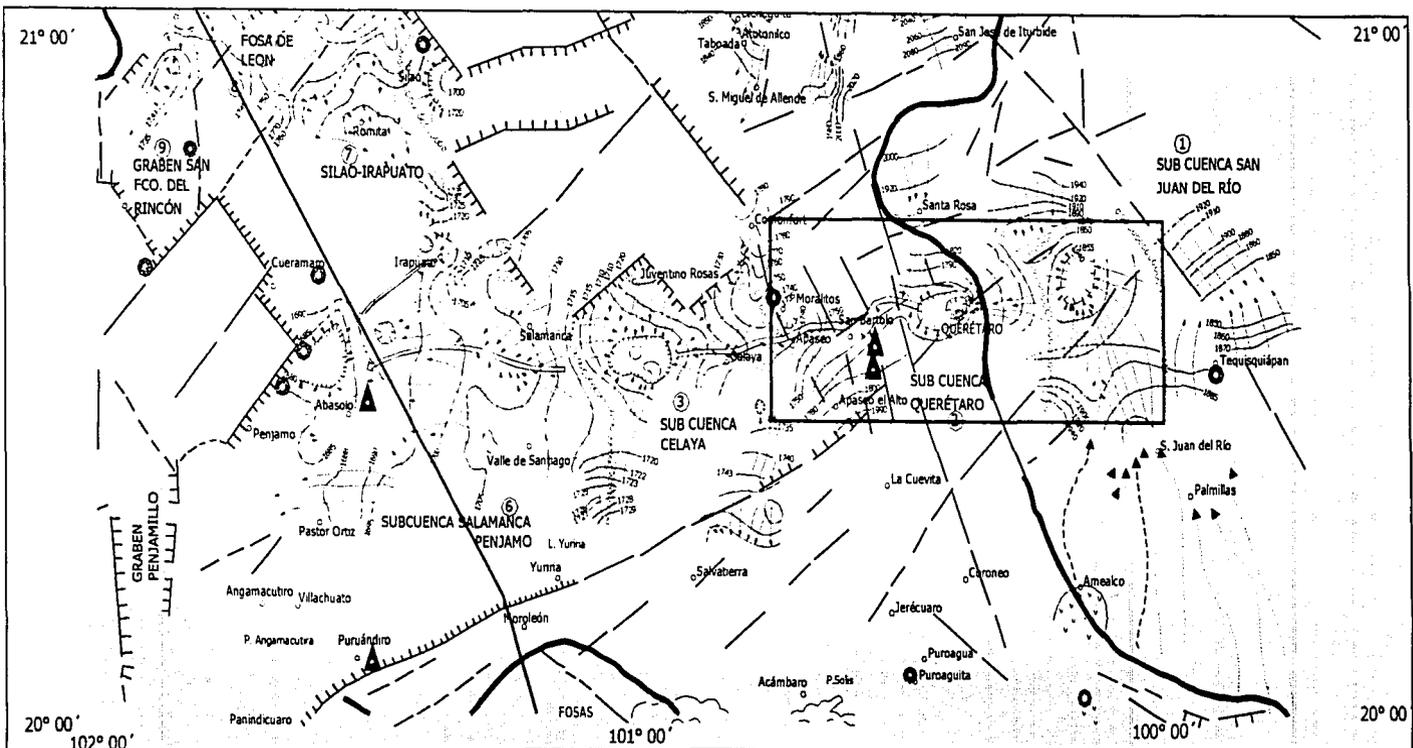
El flujo subterráneo regional tiene el mismo patrón de circulación, es decir se infiltra en el Bordo Orográfico pero este circula a profundidades del orden de los 500 metros, fluye en el fondo de la Cuenca de San Juan del Río y entra por debajo de Falla Querétaro, Falla Cañada y la Falla Corregidora. En la figura 16 modificada del Ing. Mario Veytia, 1977, se representa la dirección de flujo a nivel regional. El agua descargada en la Cuenca de los Apaseos proviene del flujo regional ascendente con temperaturas que varían de los 60° a los

88° C, principalmente a lo largo de la Falla Obrajuelo y la Falla Apaseo. En esta parte se tomaron muestras de agua para comprobar la cantidad de sólidos totales disueltos para comprobar el transporte de materia y calor que propone József Tóth para el modelo. Las concentraciones de sílice muy por encima del agua de lluvia en esta localidad, son indicadoras de que existe transporte de materia y que esta circula a profundidad cerca de un cuerpo intrusivo. Las muestras de agua tomadas en los manantiales del Predio El Salitre, Laguna el Salitre, el pozo SIIMA L-776 situado en COVEMEX y en Balneario Agua Azul en el pozo SIIMA L-751 y en el pozo Balvanera Tabla 4, la cantidad de sílice, se encuentra en el mismo orden de magnitud que establece Davis y De Wiest para las aguas termales ácidas (Tabla 4), esto comprueba que el agua ascendente circuló cerca de algún cuerpo intrusivo y está al calentarse pierde densidad y asciende por medio de los planos de fallas.

MUESTRAS	SILICE mg/L	LITIO mg/L
M1 Nido III	217.0607	0.595
M2 Pozo D.José	81.2764	0.79
M3 B. Agua Azul	108.5997	0.03
M4 Pozo Laureles	102.1286	0.101
M5 Laguna Salitre	394.4936	0.415
M6 COVEMEX	104.6893	1.032

Tabla 4 Concentraciones de Sílice y litio, Davis y De Wiest asignan agua termal ácida 216 ppm de sílice y 0.001 y 0.5 ppm al litio.

La figura 17 modificada de Ing. Mario Veytia, 1977, ilustra la continuidad hidráulica entre las cuencas de San Juan del Río, Querétaro y los Apaseos, la continuidad hidráulica y el flujo regional nos permite extender las fronteras de las cuencas y no de manera individual como se había establecido bajo los límites naturales, este modelo nos permite hacer una evaluación a manera regional para el manejo sustentable del recurso.



EXPLICACIÓN

Complejo volcánico

Falla mostrando lado Hundido

Falla general

Área de estudio

Parteaguas dinámico

Dirección principal de flujo

Cargas hidráulicas

Línea de flujo

Línea de flujo propuesta como recarga principal

Depresión del nivel del agua

Parteaguas continental

Manantial hirviendo

Manantial termal

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Modificado de Ing. Mario Veytia, 1977

Figura 17. Donde puede apreciarse la dirección de flujo en las tres cuencas y la dirección de flujo del área de recarga.

CONCLUSIONES

Una

El patrón de fallas que se tiene en la región de estudio está constituido por dos sistemas regionales: El sistema de fallas San Miguel de Allende-Taxco (N-S) y el sistema Chapala Tula (NW-SE); son los que dieron origen a las cuencas de San Juan del Río, Querétaro y los Apascos.

Dos

Con base en la estratigrafía y la geología estructural se determinó que la región de estudio estuvo sometida al menos a cuatro eventos de deformación.

Tres

La deformación del área se origina en la Mesa Central, formando inicialmente la Fallas San Miguel de Allende, Querétaro Norte y la falla Sierra de En medio, en el Oligoceno, y a partir de los 12 y 9 Ma empieza a migrar hacia el Sureste siguiendo la dirección de la Faja Volcánica Transmexicana, dando origen a las cuencas de Querétaro, San Juan del Río y los Apascos.

Cuatro

El Sistema de Fallas Chapala-Tula originado del Plioceno al Reciente interconectaron las tres cuencas favoreciendo la continuidad hidráulica entre ellas; este Sistema originado a partir de los 5.6 Ma es el que predomina en el área.

Cinco

La comparación gráfica de los niveles de agua subterránea contra las profundidades de pozos, sugiere que las cuencas de San Juan del Río, Querétaro y de los Apascos se adaptan al modelo de la Cuenca Unidad propuesta por Tóth.

Seis

De acuerdo a las características litológicas, estructurales, cargas hidráulicas y temperatura, la continuidad hidráulica de flujos de tipo intermedio y regional que tiene lugar entre las cuencas

de San Juan del Río, Querétaro y de los Apaseos que forman la Cuenca Unidad. La comunicación ocurre a través de conductos de planos de fallas, de los frentes de sierras de rocas volcánicas fracturadas y por los corredores estructurales formados por fallas y lineamientos.

Siete

Las manifestaciones de la continuidad hidráulica en la Cuenca Unidad propuesta es un sistema extenso y continuo de flujo. Presenta interdependencia de flujo entre localidades internas de la cuenca y cuencas adyacentes.

Ocho

El fenómeno de continuidad hidráulica permite abrir las barreras hidrográficas entre las tres cuencas para evaluar y administrar sus recursos hidráulicos subterráneos como una cuenca unidad.

Nueve

En la Cuenca de los Apaseos más de 400 manantiales termales con altas concentraciones de sílice indican que un flujo regional profundo es liberado por conductos de fallas y pozos profundos.

Diez

La reducida superficie de recarga y de balance volumétrico de la Cuenca de los Apaseos, comparada con la magnitud de su descarga, refuerza la propuesta de la influencia de un caudal importante de flujo regional ascendente en el fondo de la cuenca de los Apaseos.

Recomendaciones

- ❖ Realizar un estudio hidrogeoquímico inyectando un trazador y seguirlo a través de toda la Cuenca Unidad para ver la velocidad de transmisibilidad en los materiales vulcanoclasticos y el medio fracturado de el área y reforzar la teoría de la existencia de la continuidad hidráulica.

- ❖ Colocar una distribución apropiada de piezómetros a diferentes profundidades lo que permitiría en el futuro efectuar un control del nivel del agua en la Cuenca Unidad evitando con esto una sobreexplotación. Esto significaría un ahorro muy significativo en el contexto de energía, la ventaja sería el no extraer el agua a profundidades mayores en pozos cada vez más profundos, ya que el equilibrio hidrodinámico tendería a acentuarse con la pérdida de presión de poro en una cuenca y el incremento de la fuerza de potencial en otra.

- ❖ Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., en prensa, **The Amascala Caldera, Querétaro, México, geology and geochronology.** Journal of Volcanology and Geothermal Research, en prensa.
- ❖ Allan Freeze and Cherry A. John, 1979 **Groundwater**, Prentice Hall Inc. USA 1979.
- ❖ Alaniz-Álvarez, Ángel Francisco Nieto-Samaniego, María Andrea Reyes-Zaragoza, Ma. Teresa Orozco-Esquivel, Ángel Catarino Ojeda- García y Luis F. Vassallo. **Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, núm 2, 2001, p 129-148.
- ❖ Catalán Lafuente, José G, 1981. **Química del Agua.**
- ❖ Cerca- Martínez, L.M. Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000, **The geological evolution of southern Sierra de Guanajuato; a document example of transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Belt.** International Geology Review, 42,131-135.
- ❖ Chiodi, M., Monod, O., Busnardo, R., Gaspar , D., Sanchez, A., Yta, M., 1998, **Une Discordance ante Albienné datée par une faune d'ammonites et de braquiopodes de type Téthysien au Mexique Central** Geobios,21, 125-135.
- ❖ Davis, N Stanley and Wiest, J.M Roger, 1971 **Hidrogeología**, Ariel, España.
- ❖ Demant A. **Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación** Revista Mexicana de Ciencias geológicas vol, 2, num 2 (1978), p 171-187
- ❖ Ferrari Luca 2000. **Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década.** Boletín de la sociedad Geológica Mexicana v.LIII, (2000) 84-92 Instituto de Geología, UNAM.

- ❖ Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V, 1991 **Estudio geohidrológico integral del Valle de Querétaro y sus alrededores, para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos.** Tomo I.
- ❖ Geofísica de Exploraciones GUYSA S.A de C.V, 1993 **Estudio geohidrológico integral de los valles de San Juan de Río, Tequisquiapan y Ezequiel Montes, para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos.** Tomo I.
- ❖ Hamilton, W.B., 1995, **Subduction systems and magmatismo, in Smellie, J.L (ed) Volcanism associated with extension at consuming plate margins** London, Geological society, Special Publication.
- ❖ Ingeniería Geológica Computarizada, 1998. **Seguimiento al estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de los Apaseos, Gto.**
- ❖ LESSER y Asociados S.A de C.V, 1995. **Estudio geohidrológico y modelo matemático del acuífero de los Apaseos, Gto.**
- ❖ Macías G. Héctor L., 2002. **Continuidad hidráulica y flujo regional entre las cuencas San Juan del Río, Querétaro y los Apaseos.** Academia de Ingeniería.
- ❖ Reyes Zaragoza María A, 2001. **Estudio Geológico estructural de los sistemas de fallas de Querétaro, Qro.** Linares, Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Tesis Profesional.
- ❖ Suter , M Quintero–Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Farrar, E., 1995a **The Acambay graben: Active intra-arc extensión in the trans-Mexican Volcanic belt, México: Tectonics** 14,1,245-1.
- ❖ Tóth József **Hydraulic continuity in large sedimentary Basins.** Hydrogeology Journal volume 3, number 4, 1995. Official Journal of the International Association of Hydrogeologists.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

-
- ❖ Tóth József **Las aguas subterráneas como agente geológico causas, procesos y manifestaciones.** Boletín Geológico y Minero, 2000, vol. III-4, 9-16.
 - ❖ Valdez-Moreno, Gerardo de Jesús Aguirre –Díaz y Margarita López-Martínez. **El Volcán La Joya, Estado de Querétaro y Guanajuato- Un Estrato Volcán Miocénico del Cinturón Volcánico Mexicano.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 15, Número 2. 1998. p.181-187.
 - ❖ <http://gto.inegi.com.mx/territorio/esponol/menu.html> pagina oficial del Instituto Nacional de Geografía e Informática, 2001.
 - ❖ <http://qro.inegi.com.mx/territorio/esponol/menu.html> pagina oficial del Instituto Nacional de Geografía e Informática, 2001.