



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACION DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

PRESENTA:

ZAIRA VERONICA SERRATO SANDOVAL

DIRECTOR DE TESIS: ING. HECTOR LUIS MACIAS GONZALEZ



MEXICO, D.F.

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# PAGINACIÓN DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-1150

**SRITA. ZAIRA VERONICA SERRATO SANDOVAL**  
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:

**INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACION DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO**

- I INTRODUCCION**
  - II GENERALIDADES**
  - III GEOLOGIA REGIONAL**
  - IV CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS DEL ACUIFERO**
  - V RECARGA ARTIFICIAL**
  - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

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 social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D.F. a 13 de septiembre de 2001  
EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg



---

A mis padres les dedico este trabajo gracias por su esfuerzo, dedicación, cariño, confianza y por su apoyo incondicional en todos los aspectos durante toda mi carrera.

Gracias mamá

Gracias papá

A mi hermano, espero que este trabajo te sirva de estímulo para no rendirte y logres todas tu metas que te has propuesto. No te rindas porque si se puede, gracias por tu ayuda.

A todos mis amigos de una y otra bola y también a los que no son de la bola, a los que se enojaron y se contentaron a TODOS ustedes con quienes compartí grandes momentos tanto en las aulas como en el campo, así como en el puente, en las fiestas y en el café. Gracias por su amistad.

---

**A Carlos C. (mi Rqt S...e) por brindarme tu confianza, respeto, cariño, amor, paciencia y ayuda incondicional, por brindarme lo mejor de ti. Con quien me identifico en todos los aspectos. Gracias por estar a mi lado al final de esta etapa de mi vida. Gracias por el ayer, hoy y mañana.**

**Tu S.... Bb**

**A Dios .....**

---

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Departamento de Geohidrología de la División de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería, UNAM, por el apoyo recibido para la elaboración de este trabajo.

También se agradece al Sistema Operador de Agua Potable (SOAPAMA) del Municipio de Atlixco, Puebla, por las facilidades y atenciones prestadas para la realización de este anteproyecto.

En especial al Ing. Héctor Luis Macías González, así como también al Ing. Alberto Arias Paz por su apoyo, enseñanzas, comprensión y tiempo, y sobre todo por la amistad que me han brindado.

A mis profesores el Ing. Javier Arellano Gil, Ing. Luis Arturo Tapia Crespo y al Ing. Martín Carlos Vidal García, agradeciéndoles su tiempo, dedicación, comentarios, correcciones y sugerencias para este trabajo.

Al Ing. Benjamín Márquez Castañeda por sus enseñanzas y vivencias compartidas, a quien admiro y respeto.

Así mismo agradezco al Sr. Luis Alberto Gallardo Carreto por la colaboración en el manejo del programa Autocad para el dibujo de los mapas, así como también al Sr. Alberto Palomo por las facilidades prestadas para llevar a cabo el análisis petrográfico y al Ing. Sergio Yussim por la aportación de la imagen de satélite.

---

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
ANTECEDENTES .....	3
OBJETIVO .....	5
MÉTODO DE TRABAJO .....	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>GENERALIDADES</b> .....	8
AREA DE ESTUDIO .....	8
VÍAS DE COMUNICACIÓN.....	8
CLIMA.....	11
VEGETACIÓN .....	11
OROGRAFÍA .....	14
HIDROGRAFÍA .....	14
FISIOGRAFÍA .....	15
CLASIFICACIÓN Y USO DEL SUELO .....	17
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>GEOLOGÍA REGIONAL</b> .....	21
ESTRATIGRAFÍA .....	21
MARCO TECTÓNICO REGIONAL .....	29
GEOLOGÍA HISTÓRICA.....	32
GEOLOGÍA LOCAL.....	33



---

**CAPÍTULO IV**

<b>CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL ACUÍFERO .....</b>	<b>43</b>
CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS .....	43
POROSIDAD.....	43
PERMEABILIDAD.....	45
TRANSMISIVIDAD .....	48
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO .....	48
UNIDADES HIDROGEOLOGÍCAS .....	49
OBSERVACIONES CON EL PERMEAMETRO.....	54
MEDICIONES CON MOLINETE HIDRÁULICO .....	57
PRUEBAS DE BOMBEO .....	60
MÉTODO DE TRABAJO.....	60
RESULTADOS .....	61
MODELO CONCEPTUAL.....	62

**CAPÍTULO V**

<b>RECARGA ARTIFICIAL .....</b>	<b>64</b>
REINFILTRACIÓN POR NORIAS RADIALES DE ABSORCIÓN.....	67
REINFILTRACIÓN POR MEDIO DE AGUA REPRESADA.....	72

**CAPÍTULO VI**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>76</b>
CONCLUSIONES .....	76
RECOMENDACIONES.....	77
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>78</b>
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>81</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA.....	9
2. VÍAS DE COMUNICACIÓN.....	10
3. CLIMAS.....	12
4. OROGRAFÍA.....	19
5. HIDROGRAFÍA.....	20
6. LOCALIZACIÓN DE MUESTREO.....	27
7. GEOLÓGICA.....	41
7a. IMAGEN DE SATÉLITE.....	42
8. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	52
9. PERMEÀMETRO DE GUELPH.....	55
10. DISEÑO DE NORIA.....	68
11. PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN PARA NORIA.....	68
12. LOCALIZACIÓN DE OBRAS DE INFILTRACIÓN.....	70
13. CURVAS DE ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO.....	71
14. OBRAS PROPUESTAS.....	75

---

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

1. ÁRBOL FREATOFITA.....	13
2. TOBAS VITROCRISTALINAS .....	33
3. TOBA ESTRATIFICADA .....	34
4. DIATOMEA .....	34
5. ESTRATIFICACIÓN DE TOBAS .....	35
6. LAVAS ALMOHADILLADAS .....	37
7. PARED DE BASALTOS COLUMNARES.....	38
8. BASALTOS COLUMNARES .....	38
9. MANANTIAL DE METEPEC ABANDONADO.....	39
10. MANANTIAL DE METEPEC ABANDONADO.....	39
11. MANANTIAL DE SAN BALTAZAR ATLIMEYAYA.....	40
12. MANANTIAL DE SAN BALTAZAR ATLIMEYAYA.....	40
13. CASCADA .....	59
14. FRACTURAMIENTO DE ANDESITAS .....	73

---

## ÍNDICE DE TABLAS

1. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL VALLE DE ATLIXCO - IZUCAR.....	24
2. PETROGRAFÍA.....	28
3. POROSIDAD DE TOBAS .....	45
4. EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MANANTIALES .....	46
5. PERMEABILIDAD DE ACUERDO CON BREDDING Y DÜRBAUM.....	47
6. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	51
7. COLUMNA GENERAL DE LAS UNIDADES GEOHIDROLÓGICAS .....	53
8. MEDICIONES CON PERMEÁMETRO .....	56
9. AFORO DE LAS DESCARGAS EN LOS FRENTE DE LOS MANANTIALES .....	58
10. DATOS DE PRUEBAS DE BOMBEO .....	61

---

## RESUMEN

Se realizó un estudio en el poblado de Atlixco, Puebla, en la vertiente oriental del Volcán Popocatepetl un extenso frente de aproximadamente 91.2 Kilómetros cuadrados, de coladas volcánicas. Esta vertiente es receptora de las lluvias y las nevadas ocasionales. El agua recibida sobre esta superficie se infiltra a través de un denso sistema de fracturas generando una recarga con movimiento preponderantemente vertical; al descender topográficamente atravesando el espesor de derrames y al encontrarse con los depósitos epiclásticos y lahares, por contraste de permeabilidades, el movimiento se convierte en horizontal, después de haber recorrido algunos kilómetros y haber permanecido algún tiempo dentro de las andesitas. Al encontrar el agua las últimas porciones de los derrames lávicos, ocurren manantiales todos ellos alineados bajo un control estructural bien definido de rumbo sensiblemente N-S.

Las descargas naturales se localizan, de norte a sur, en San Baltasar Atimeyaya, Metepec Abandonado y Axocopan, con un caudal aforado de 3.88 m<sup>2</sup>/s. De estas una fracción del manantial de Axocopan es utilizado para el abastecimiento de agua potable de Atlixco, otra fracción, la mayor y sin uso, descarga directamente en la Barranca de Cantarranas, y otra se conduce por una red compleja de canales que cruzan la localidad y vierten sus volúmenes en la Barranca de Cuescomate. Por otra parte, el Sistema Operador de Agua Potable (SOAPAMA), administra la operación de 16 pozos para la población con un caudal de 216 litros por segundo, siendo esta la principal fuente de abastecimiento, la cual ha generado en los últimos años abatimientos de 0.80 metros por año.

Por lo que se llevó a cabo un estudio geohidrológico con el objetivo de dar alternativas viables para reinfiltrar al subsuelo los caudales no aprovechados para intentar atenuar el ritmo de dichos abatimientos. Con el fin de conocer la capacidad transmisora del acuífero, se aforaron los volúmenes de los tres manantiales, se efectuaron reconocimientos hidrogeológicos y se realizaron 12 pruebas de bombeo, cuyos valores de transmisividades variaron de  $4.11 \times 10^{-2}$  a  $4.46 \times 10^{-5}$  metros cuadrados. Con estos resultados se propuso construir un pozo de absorción radial de gran diámetro con la finalidad de conocer la capacidad de toma. La primera prueba se realizó llenando de agua el pozo de prueba con 3.2 metros de diámetro y 10.71 metros de profundidad, ubicado a 14 metros por encima del nivel estático.

Un volumen de 115 m<sup>3</sup> se infiltró en 10 horas, por lo que se concluye que el pozo tomó a razón de 3.2 litros por segundo durante la prueba. El llenado de la noria no fue constante y fue a razón de 10 litros por segundo con un llenado del 75%. En las dos primeras horas del llenado, se presentó flujo de agua en un pozo de observación localizado a 2.7 metros de la prueba, reconociendo principalmente zonas de fracturamiento. De lo anterior se deduce que de tal manera que pudiera infiltrarse por lo menos un caudal de 100 litros por segundo con la construcción de por lo menos 12 obras similares, localizadas en el frente de recarga natural del acuífero sobre explotado. Esto ayudaría a reducir la tendencia de los abatimientos a un bajo costo.

---

Otra de las propuestas para el aprovechamiento y/o infiltración del agua es la construcción de una presa. La cual estaría asentada sobre la roca andesítica, la altura de la cortina sería de 7 metros aproximadamente, con la finalidad de no ahogar el manantial de Metepec abandonado el cual se encuentra ubicado aguas arriba del lugar donde estaría ubicada la presa.

En cuanto a la calidad del agua que se infiltraría, se tiene previsto, en función de la capacidad de recursos del SOAPAMA, realizar análisis físico-químicos de los manantiales ya que estos son contaminados desde los primeros metros de su nacimiento. Si se optara por la construcción de las norias se realizaría un análisis de la infraestructura de conducción ya que es posible utilizar la existente dando un saneamiento adecuado. Y si se optara por la construcción de la presa se tendrían que realizar estudios a detalle de aquellos parámetros que pueden beneficiar o perjudicar tanto sus alrededores, así como la construcción de la presa.

La elección de cualquiera de los proyectos propuestos sería benéfico para el acuífero, en el futuro ayudando a disminuir la tendencia de los abatimientos.

---

Otra de las propuestas para el aprovechamiento y/o infiltración del agua es la construcción de una presa. La cual estaría asentada sobre la roca andesítica, la altura de la cortina sería de 7 metros aproximadamente, con la finalidad de no ahogar el manantial de Metepec abandonado el cual se encuentra ubicado aguas arriba del lugar donde estaría ubicada la presa.

En cuanto a la calidad del agua que se infiltraría, se tiene previsto, en función de la capacidad de recursos del SOAPAMA, realizar análisis físico-químicos de los manantiales ya que estos son contaminados desde los primeros metros de su nacimiento. Si se optara por la construcción de las norias se realizaría un análisis de la infraestructura de conducción ya que es posible utilizar la existente dando un saneamiento adecuado. Y si se optara por la construcción de la presa se tendrían que realizar estudios a detalle de aquellos parámetros que pueden beneficiar o perjudicar tanto sus alrededores, así como la construcción de la presa.

La elección de cualquiera de los proyectos propuestos sería benéfico para el acuífero, en el futuro ayudando a disminuir la tendencia de los abatimientos.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

La Ciudad de Atlixco se encuentra a 1,881 metros sobre el nivel del mar, al pie de la ladera sureste del Volcán Popocatepetl. El clima es semicálido húmedo con lluvias durante el verano y parte del otoño, siendo la temperatura promedio de 22°C. Es un importante centro industrial, agrícola y ganadero. Produce aguacate y cultiva flores y frutas tropicales. Hay varias fábricas de tejidos de algodón, lanas, bebidas gaseosas y alcohol. Cuenta con buenos servicios turísticos.

La ciudad de Atlixco se asienta en el fértilísimo valle del mismo nombre, que formó parte del gran complejo cultural Puebla - Tlaxcala y que probablemente tuvo como centro rector la ciudad de Cholula. Para finales de la época prehispánica la región se conocía con el nombre de Acapetlahuacan, que significa "lugar donde tienen esteros las cañas" y Atlixco – "ojo o nacimiento de agua" – fue el nombre de una región que tuvo como núcleo un manantial y se localiza a escasos kilómetros de la ciudad.

Uno de los valles más fértiles es el de Atlixco, surcado por innumerables arroyos que se nutren de las aguas de deshielo del Popocatepetl y que alimentan al río Nexapa que atraviesa el valle.

En esta región se localizan varios balnearios, los cuales cuentan con aguas termales. También se pueden apreciar en la región algunas cascadas, así también como algunos manantiales en las poblaciones de San Baltazar Atlimeyaya, Metepec Abandonado y Axocopan.

En la vertiente oriental del Volcán Popocatepetl se tiene, un extenso frente de aproximadamente 91.2 Kilómetros cuadrados de coladas volcánicas (andesitas); son receptoras del agua de lluvia y de las nevadas ocasionales que ocurren en esta vertiente.

El agua recibida sobre esta extensa superficie de rocas volcánicas se infiltra a través de un denso sistema de fracturas, generando una recarga con movimiento preponderadamente vertical; el agua desciende topográficamente, atravesando el espesor de los derrames hasta encontrarse con los depósitos epiclásticos. Por contraste de permeabilidades se propicia la descarga del agua circulante en las fracturas después de que ésta ha recorrido algunos kilómetros y ha permanecido algún tiempo dentro de andesitas. Al encontrar el agua las últimas porciones de los derrames lávicos, ocurren manantiales, todos ellos alineados bajo un control estructural bien definido de rumbo sensiblemente N-S, en los puntos conocidos como San Baltazar Atlimeyaya, Metepec Abandonado y Axocopan. El caudal aforado en los frentes de estas fuentes es de aproximadamente 3.88 m<sup>3</sup>/s.



En estos sitios por la diferencia de conductividades hidráulicas del contacto geológico de los derrames volcánicos con los depósitos epiclásticos (tobas vitreocritalinas, pumicíticas), el movimiento se convierte en horizontal, infiltrándose un volumen no conocido en los sedimentos volcanoclásticos, moviéndose en el subsuelo hacia la planicie.

De este caudal, solo 113 litros por segundo, descargados por el Manantial de Axocopan (en la caseta del balneario), son utilizados para el abastecimiento de agua potable de Atlixco; el resto es aplicado en riego, industrias y uso lúdico. Otra fracción (tal vez la mayor), sin uso, descarga directamente en la Barranca de Cantarranas y otra se conduce por canales que cruzan la ciudad y vierten en la de Barranca de Cuescomate.

En la misma zona, el Sistema Operador de Agua Potable de Atlixco (SOAPAMA) administra la operación de 16 pozos para el abastecimiento de agua potable de esta población que producen en conjunto 215.38 litros por segundo (extracción en diciembre de 1997).

Datos registrados por la compañía GEOCALLI (1982), en la porción central de ésta zona durante el período de 1979 – 1990 (11 años), revelan que los abatimientos del nivel freático han sido de 10 metros, siendo menor hacia los límites de la cuenca.

En marzo de 1998 se determinó que la extracción de agua llevada a cabo en el área de estudio por la red de pozos durante varias décadas, ha ocasionado una sobreexplotación de los acuíferos en el valle, que se manifiesta en un descenso medio anual de 0.80 metros en el nivel del agua en los pozos.

Ante la alarmante situación, la administración del Municipio contempló con gran visión, para la salvaguarda de los recursos hidráulicos del valle, la factibilidad de reinfiltrar al subsuelo, mediante recarga artificial, los excedentes de las descargas de los manantiales.

Con el propósito de estudiar esta factibilidad, el SOAPAMA se dirigió a la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para que a través de un intercambio de colaboración se realizaran las investigaciones conducentes.

La primera etapa se llevó a cabo los días 26, 27 y 28 de marzo de 1998. En esos tres días se efectuaron 22 mediciones con molinete hidráulico en escurrimientos superficiales y once pruebas de bombeo en los pozos municipales. De manera previa, se realizaron reconocimientos hidrogeológicos preliminares.

La segunda etapa se llevó a cabo en abril y septiembre del 2000. En esos días también se efectuaron mediciones con molinete y pruebas de conductividad hidráulica con un permeámetro; esta prueba se realiza a nivel superficial, también se tomaron las temperaturas y conductividades eléctricas de diferentes puntos.

La tercera etapa fue en febrero de 2001. Al igual que en septiembre del 2000, también se realizaron pruebas con molinete hidráulico, de conductividad hidráulica y se midieron temperaturas. Se realizó el levantamiento geológico ubicando los afloramientos con un GPS (Geo-posicionador satelital) Garmín 45; se obtuvieron algunas muestras con la finalidad de corroborar la litología que se tiene en la carta geológica escala 1:50 000, así como también la descripción de afloramientos.

## 1.2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es:

- **Localizar los puntos y/o áreas más favorables y los métodos más apropiados para reinfiltrar agua excedente al subsuelo.**

Se realizaron las siguientes actividades para poder alcanzar el objetivo:

1. Definición del modelo de funcionamiento hidrogeológico del Valle de Atlixco mediante reconocimientos de campo y revisión de literatura hidrogeológica disponible.
2. Se reconoció la capacidad transmisora de doce de los pozos en operación del valle, mediante la ejecución en cada uno de ellos de pruebas de bombeo a caudal constante.
3. Se calculó el volumen descargado por los tres manantiales mediante aforos en sus frentes de descarga y en diferentes puntos de sus escurrimientos en canales para conocer el monto de los volúmenes aproximados a reinfiltrar.
4. Se identificó el método de reinfiltración más apropiado a las condiciones hidrogeológicas del valle, a las características hidrodinámicas de los pozos en operación, y a su posición en relación con la red de canales.

### 1.3 MÉTODO DE TRABAJO

- CAMPO

Conforme a la metodología y actividades que fueron programadas para el "Estudio Geohidrológico de Atlixco, Puebla", se procedió a hacer un reconocimiento general del área; se realizaron 12 pruebas de bombeo de los pozos del municipio; así como también se hicieron mediciones de temperatura y conductividad eléctrica en los manantiales. Se realizaron aforos con molinete en canales y ríos y se obtuvieron conductividades hidráulicas en diferentes puntos, estos se hicieron con un permeámetro de carga constante.

Se describieron las características litológicas de los afloramientos y obteniéndose muestras de cada punto de verificación con cambio de litología, las que se consideraron para un posterior estudio petrográfico, así como la obtención de pruebas de porosidad; además se realizaron caminamientos para verificar sitios de interés o de incertidumbre, estos sitios fueron posicionados geográficamente con un GPS (Geo-posicionador satelital) Garmin 45.

Por otra parte se realizó también un reconocimiento del área para identificar lugares favorables para la construcción de las obras propuestas para recarga del acuífero (ver Capítulo V).

- LABORATORIO

Las muestras colectadas en el Campo, se utilizaron para el estudio petrográfico, se laminaron, se estudiaron y se clasificaron; también fueron utilizadas para determinar características petrofísicas.

- GABINETE

En los inicios del proyecto se compiló, sintetizó y analizó la información correspondiente al área de estudio y las de áreas próximas, se obtuvo información de las cartas Geológica, Topográfica, Edafológica, Hidrológicas de aguas subterráneas y superficiales, Vías de comunicación a escala 1: 50 000 y 1: 250 000.

Una vez obtenidos los datos petrográficos, se procedió a la corrección y modificación del mapa preliminar, para elaborar el definitivo; se elaboró así mismo la columna geológica.

También se elaboraron gráficas de las pruebas de bombeo, las cuales se realizaron con la ayuda de un paquete de computo llamado Aquifer-test, con la finalidad de obtener valores de transmisividad (T).

---

- DURACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo de campo se efectuó en cuatro visitas.

La primera se realizó en el transcurso de cuatro días durante el mes de marzo de 1998, como parte de una práctica escolar de la asignatura de Geohidrología, en la que participaron 21 estudiantes; se realizó con la finalidad de obtener información de pruebas de bombeo, así como la medición de los aforos en distintos puntos.

La segunda, de tres días, se llevo a cabo en abril de 2000, donde primeramente se hizo un reconocimiento geológico de la zona, así como también se estudiaron las principales características físicas de los manantiales. También se tomaron algunas pruebas con el permeámetro y el molinete, así como datos de temperatura y conductividad eléctrica.

La tercera y cuarta visita, se realizaron en septiembre de 2000 y febrero de 2001 respectivamente, fue necesario complementar la información geohidrológica y geológica, así como aclarar algunas dudas.

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES**

#### **2.1 ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio está localizada en la Región Central de la República Mexicana dentro de la Provincia Fisiográfica denominada Eje Volcánico Mexicano; su localización al centro del poblado de Atlixco, Puebla, toma como referencia las siguientes coordenadas geográficas, 18°55' de latitud Norte y 98°26'12" de Longitud Oeste (Figura 1).

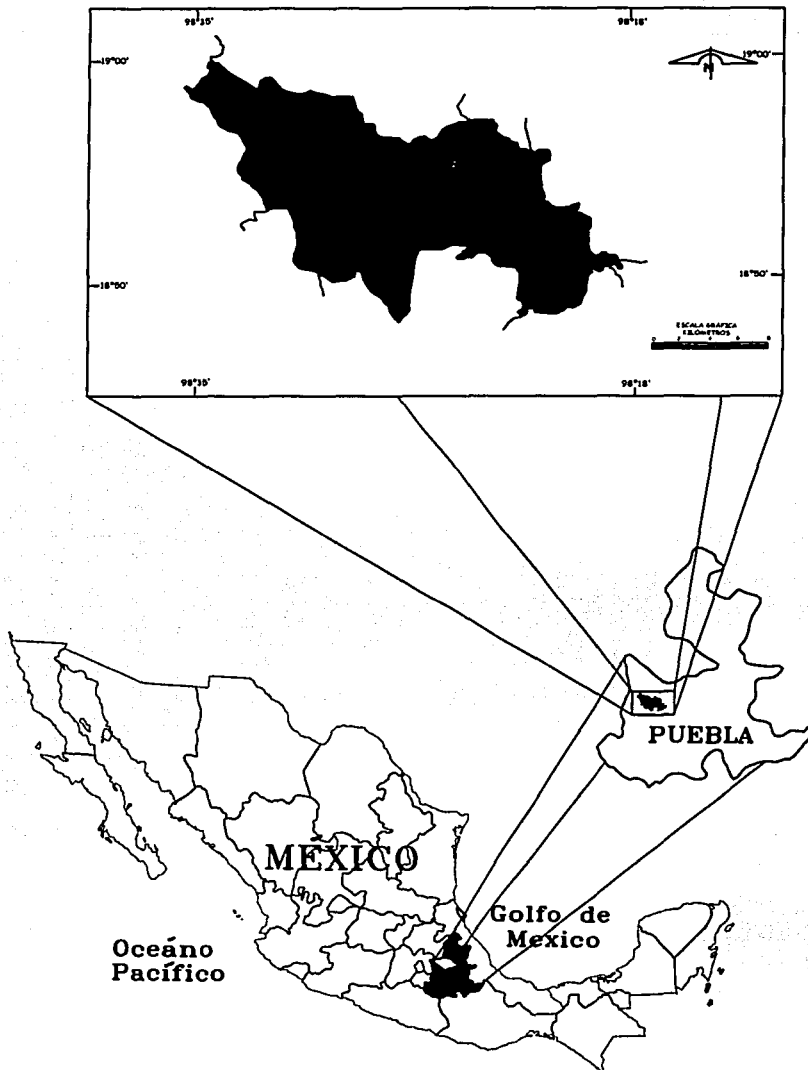
El municipio tiene una superficie de 229.22 kilómetros cuadrados, que lo ubica en el 51 lugar con respecto a los demás municipios del estado; representa el 0.82% de la superficie del estado. El área de estudio tiene una superficie de 130 Kilómetros cuadrados aproximadamente.

El municipio cuenta con 95 comunidades; citándose únicamente las más importantes del área de estudio: Axocopan, El León, Metepec, San Jerónimo Coyula, San Martín Tlapala, El León, Cabrera, San Baltazar Atlimeyaya y San Juan Tianguismanalco. El municipio colinda al Norte con los municipios de Tochimilco, Tianguismanalco y Santa Isabel Cholula; al Sur con San Diego. La Mesa Tochimiltzingo; Huaquechula y Atzitzihuacán. Al Este desde los municipios de Santa Isabel Cholula, Ocoyucan, Teopantlán y San Diego La Mesa Tochimiltzingo hasta Atzitzihuacán y Tochimilco al Oeste a lo largo del paralelo 19 y se caracterizan por estar constituidas por una gran cantidad de rocas extrusivas emitidas por el volcán Popocatepetl.

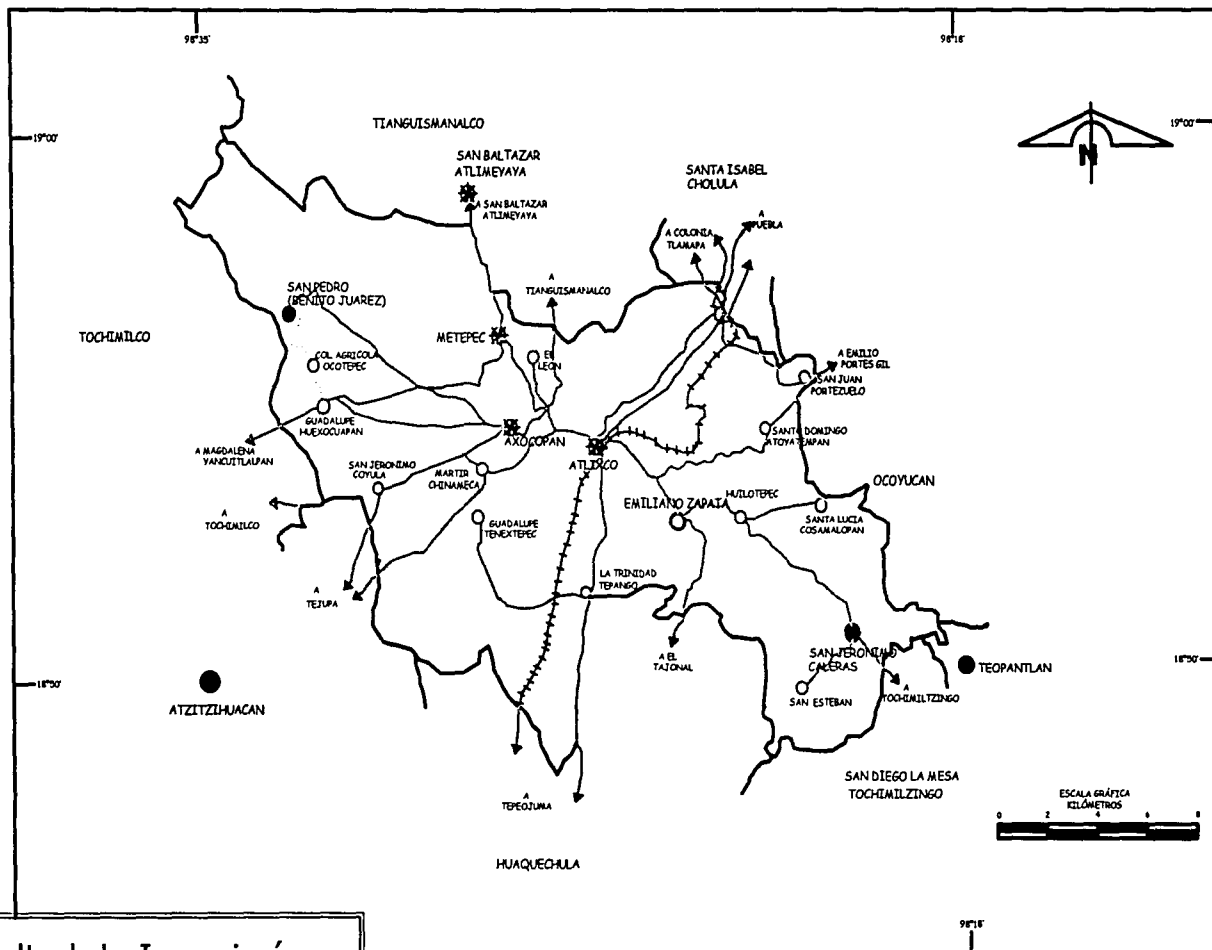
#### **2.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN**

La carretera Panamericana federal 190, atraviesa el municipio de Sur a noreste, cruzando por la carretera municipal. De la ciudad de Atlixco parten 3 carreteras secundarias que comunican a San Diego, la Mesa Tochimiltzingo, Tianguismanalco y Tochimilco. Lo cruza el ferrocarril de vía angosta México - Cautla - Puebla.

Existe una aeropista que carece de servicio regular. Tiene una estación radiodifusora y recibe señal de estaciones estatales y nacionales. A la localidad llegan diversos periódicos estatales y nacionales. Cuenta con servicio de correo, telégrafo y teléfono (Figura 2).



<b>Facultad de Ingeniería UNAM</b>	
INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO	
Localización del área	
<b>Tesis Profesional</b>	
Zaira V. Serrato Sandoval	Figura 1



Facultad de Ingeniería  
UNAM

INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

VÍAS DE COMUNICACIÓN

Tesis Profesional

Zaira V. Serrato Sandoval

Figura 2

SIMBOLOGÍA

- CARRETERA
- TERRACERÍA
- ..... BRECHA
- ++++ FERROCARRIL
- CABECERA MUNICIPAL, LOCALIDAD

INEGI. Carta de Climas

## 2.3 CLIMA

Dentro del municipio se presenta la transición entre los climas templados del norte del estado y los cálidos del sur; las variantes son (Figura 3):

*SEMICALDO SUBHÚMEDO CON LLUVIAS EN VERANO DE HUMEDAD MEDIA*; temperatura media anual entre 18° y 22°C. Este clima se localiza al centro del municipio, representando un 36.82 % de la superficie municipal.

*SEMICALDO SUBHÚMEDO CON LLUVIAS EN VERANO DE MENOR HUMEDAD*; temperatura media anual entre 18° y 22°C. Se localiza al sur del municipio y ocupa un 6.86 % de superficie.

*TEMPLADO SUBHÚMEDO CON LLUVIAS EN VERANO DE MAYOR HUMEDAD*; temperatura media anual entre 12° y 18°C. Este clima es característico de las áreas montañosas del NW, es decir de las estribaciones de la Sierra Nevada. Representa el 33.21 % de la superficie municipal. Este clima se presenta en los poblados de San Baltazar Atlimeyaya y Metepec.

*TEMPLADO SUBHÚMEDO CON LLUVIAS EN VERANO DE HUMEDAD MEDIA*; temperatura media anual entre 12° y 18°C. Se localiza al sureste y extremo noreste, en las zonas montañosas. Representando el 21.70 % de la superficie municipal. Este clima es característico del poblado de Axocopan.

*SEMIFRÍO SUBHÚMEDO CON LLUVIAS EN VERANO DE MAYOR HUMEDAD*; se localiza en las zonas montañosas, en las partes altas y representa el 1.41 % de la superficie municipal, como se puede observar en la figura 3.

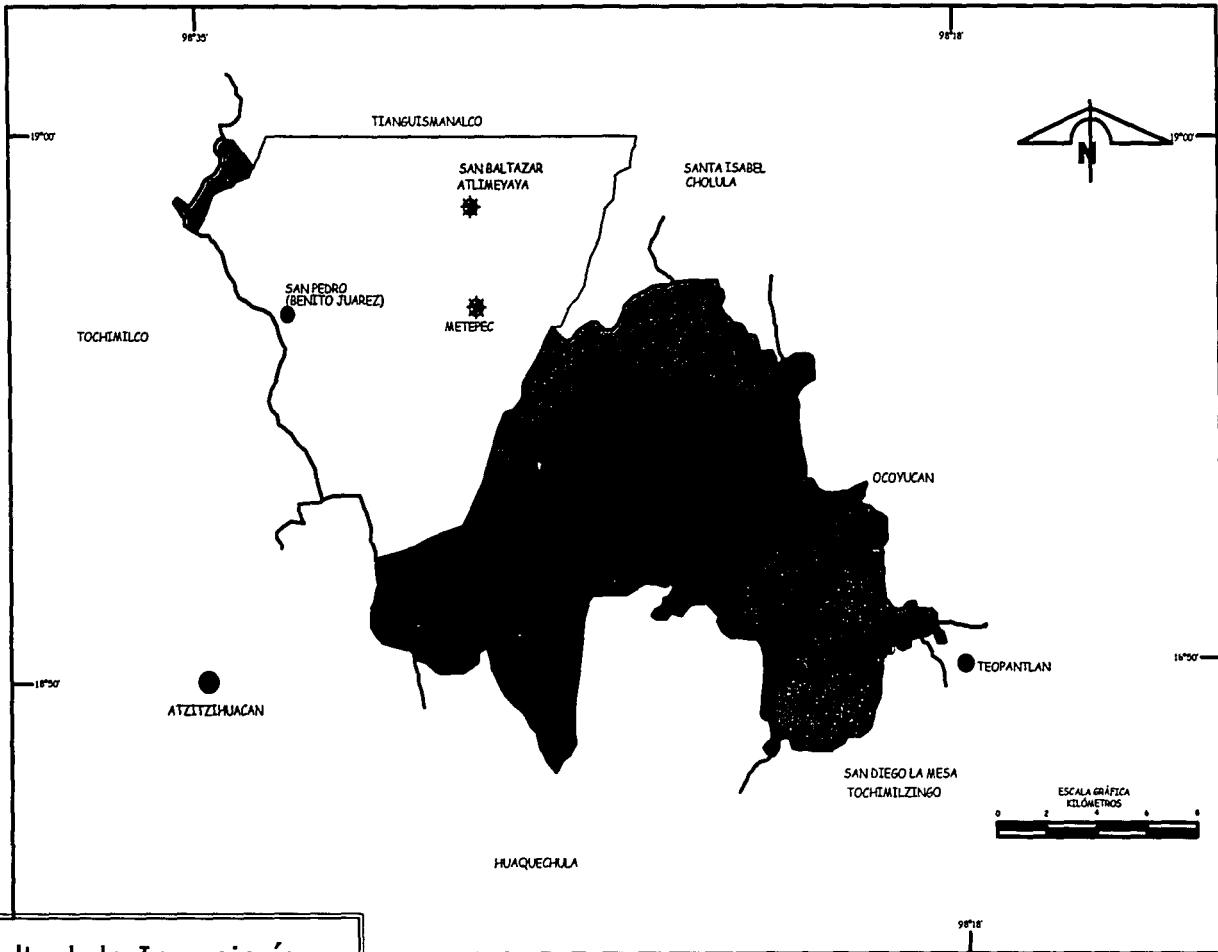
Es importante resaltar que la población local refiere que en Atlixco se encuentra con el mejor clima del mundo.






## 2.4 VEGETACIÓN

La vegetación es un factor que influye en la infiltración y por lo tanto contribuye al incremento del agua subterránea. Una de las grandes ventajas que presenta la cubierta vegetal, es la de disminuir la evaporación, lo cual ayuda a aumentar el agua disponible para infiltrarse.

De acuerdo con la carta de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:50 000 de Atlixco, Puebla, se tiene una vegetación de bosque de pinos (subperennifolia) y en algunas áreas al noroeste (San Baltazar Atlimeyaya y Metepec), también se presenta el bosque de caducifolia y cedro blanco, es decir vegetación arbórea mezclado con matorral inerme. La mayor parte de las zonas planas están dedicadas a la agricultura de riego, constituyendo un área enorme, igual o mayor que la de Izucar de Matamoros; se siembran tanto cultivos anuales como semipermanentes.





-  Semicálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad media
-  Semicálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad
-  Templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad
-  Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media
-  Semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad

INEGI. Carta de Climas

Facultad de Ingeniería  
**UNAM**

INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

CLIMAS

Tesis Profesional

Zaira V. Serrato Sandoval

Figura 3

Para la Secretaría de Gobernación (1987), al noroeste, en las estribaciones de la Sierra Nevada, se ha introducido la agricultura temporalera, por lo que la deforestación que se ha producido en esta zona es enorme, repitiéndose un proceso muy común: substituir las áreas boscosas, en este caso pinos y cedros, para introducir una agricultura de subsistencia en suelos no aptos para estas actividades y que tienden a agotarse por este mal uso.

También se encuentra dentro del área con plantas llamadas freatofitas. Éstas se alimentan de agua subterránea y su única característica es que satisfacen sus necesidades extendiendo sus raíces hasta el manto freático. Estas plantas sirven como indicadores de la presencia de agua subterránea e inclusive de la red de flujo y calidad de la misma, es decir, son indicadores de la cercanía del manto freático.

De acuerdo con Maderey Rascon (1967), el nombre que se le da a las freatofitas que se tienen en la región pertenecen a *Distichilis spicata*. Su nombre vulgar en inglés es "salt grass". Tienen una amplia distribución en casi toda la República. Hay algunas de ellas que indican la presencia del manto freático a pocos metros bajo la superficie; en cambio otras pueden extender sus raíces hasta los 3.66 metros para alcanzar el agua a gran profundidad llamadas *Salix*, nombre vulgar sauce, siendo éstas de un tamaño menor y de consistencia más raquíca que las que se desarrollan donde el manto freático está cercano a la superficie. En cuanto a la calidad del agua hay algunas plantas freatofitas que son bastante tolerantes al agua mineralizada, en cambio otras no lo son.

Las freatofitas *Distichilis spicata* son indicadoras de agua muy mineralizada; sin embargo el agua más profunda puede ser de mejor calidad. Estas plantas se pueden ver en San Baltazar Atlimeyaya cerca de los manantiales y en Metepec Abandonado (en el lugar propuesto para la construcción de una presa) suelen presentarse en las margen del río Apiaxco. En la fotografía 1 se muestra una freatofita que se encuentra cerca al manantial de San Baltazar Atlimeyaya.



Fotografía 1. Que muestra el tamaño del árbol freatofita (Ahuehete), en la localidad de San Baltazar Atlimeyaya.

## 2.5 OROGRAFÍA

De acuerdo con la Secretaría de Gobernación (1987), el territorio del municipio se encuentra comprendido dentro de dos unidades morfológicas divididas por la cota 2,000 que divide al sector noroeste; hacia el noroeste se encuentra el Valle de Puebla, y de la cota antes mencionada hacia el este, el Valle de Atlixco; ambos descienden de las faldas meridionales de la Sierra Nevada. Aunque la cota 2000 hacia el noroeste es considerado como el Valle de Puebla que forma parte importante para el Valle de Atlixco ya que por su topografía sus escurrimientos tienen una dirección hacia dicho valle.

La orografía del terreno muestra su menor altura al sur con 1,700 metros sobre el nivel del mar; conforme se avanza hacia el noroeste, el nivel del terreno va ascendiendo suavemente, por ser estribaciones del volcán Iztaccíhuatl; en el extremo noroeste alcanza la cota de 2,900.

El centro del municipio es un extenso valle, que lo recorre de norte a sur, y es donde se concentran la mayor parte de las localidades y vías de comunicación. Al sureste, aparecen elevaciones montañosas aisladas que culminan en los cerros de Zoapiltepec y Texistle, que alcanzan un nivel superior al 2,100 metros sobre el nivel del mar; también existen algunos cerros aislados al norte, como el Pochote, Tecuitlacuelo, Loma La Calera y El Charro.

Dentro del municipio se tienen como elevaciones principales al Cerro Zoapiltepec con 2,360 metros, su punto de mayor altitud se encuentra en el paralelo  $18^{\circ} 51'$  latitud norte y el meridiano  $98^{\circ} 22'$  longitud oeste; el Cerro El Charro con 2120 metros, su punto más alto se encuentra en el paralelo  $18^{\circ} 55'$  latitud norte y el meridiano  $98^{\circ} 29'$  longitud oeste; el Cerro Tecuitlacuelo con 2,100 metros, su elevación máxima se encuentra en el paralelo  $18^{\circ} 56'$  y el meridiano  $98^{\circ} 25'$ ; el Cerro Tlacoltepel con 2,000 metros, su punto de mayor altitud está en el paralelo  $18^{\circ} 51'$  y el meridiano  $98^{\circ} 19'$ ; el Cerro San Miguel con 1,980 metros, se encuentra en el paralelo  $18^{\circ} 55'$  y el meridiano  $98^{\circ} 26'$ ; el Cerro La Tolva con 1,960 metros, en el paralelo  $18^{\circ} 54'$  y el meridiano  $98^{\circ} 22'$ ; el Cerro Crustepetl con 1940, se encuentra en el paralelo  $18^{\circ} 52'$  y el meridiano  $98^{\circ} 31'$ ; el Cerro La Cuatillera con 1940 metros, se encuentra en el paralelo  $18^{\circ} 50'$  y el meridiano  $98^{\circ} 20'$ , como se muestra en la Figura 4.

## 2.6 HIDROGRAFÍA

El municipio de Atlixco pertenece a la región hidrológica número 18, Río Balsas, cuenca del Río Atoyac, subcuenca del Río Nexapa, afluente del Atoyac.

Esta región comprende la mayor parte de la entidad, abarca las zonas del centro, oeste y sureste. Tiene como cuenca principal la del Río Atoyac, que es la corriente permanente más importante del Balsas, y esta considerada como su origen.

El río Atoyac se forma a partir de los deshielos que descienden desde altitudes superiores a los 4,000 metros, del flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl, en los límites de los estados de México y Puebla. En su recorrido recibe varias aportaciones relevantes por una y otra margen como lo son los ríos Nexapa, Mixteco, Acatlán, Zahuapan, Alseseca y otros.

El rango de escurrimiento en esta cuenca es menor de 10 milímetros y el gasto medio de sus corrientes es de 9.15 m<sup>3</sup>/seg. Este promedio se obtuvo de las 14 estaciones hidrométricas ubicadas en la entidad, de las cuales se tienen registros de un periodo de 12 años. Dicho gasto corresponde al 55% de los escurrimiento aforados en el estado.

Para el área de estudio, el río Apiaxco es formado principalmente de las aportaciones que recibe de las descargas de los manantiales San Baltazar Atlimeyaya, Metepec Abandonado y Axocopan, así como de algunas cascadas en el municipio de Atlixco. Estos se forman a partir de los deshielos y lluvias que descienden de la vertiente oriental del Volcán Popocatepetl, infiltrándose a través del denso sistema de fracturas. De este caudal solo una parte es utilizado para el abastecimiento de agua potable de Atlixco; el resto es aplicado en riego, industrias y uso lúdico. Otra fracción sin uso, descarga directamente en la Barranca de Cantarranas, otra se conduce por canales que cruzan la ciudad y vierten en la Barranca de Cuescomate (Figura 5).

## 2.7 FISIOGRAFÍA

La región de Atlixco se encuentra en la Provincia Fisiográfica correspondiente al Eje Neovolcánico. Esta provincia es una de las más espectaculares, debido a sus prominencias topográficas que se encuentran a lo largo de unos 950 Kilómetros desde la región del volcán de Ceboruco, Nayarit al poniente, hasta el volcán del Citlaltepetl al oriente. Su anchura varía de 50 a 150 Kilómetros, pero la que se considera y aparece en la Carta Geológica de México (1976), está limitada aproximadamente entre los paralelos 19° a 21° Latitud Norte. Ha recibido numerosos nombres desde "Zona Eruptiva" por Ordóñez (1896); la Sierra de los Volcanes por Garfías y Chapin, 1949; Neovolcanic Plateau por E. Raisz 1969; "Faja Volcánica Transmexicana" (Mooser y M. Maldonado K., 1967). "Eje Neovolcánico (López Ramos y otros, 1972-1974), la región del Eje Neovolcánico Transmexicano (1976) por A. Demant y otros, finalmente se ha retomado el nombre de Faja Volcánica Transmexicana, por Luca Ferrari (2000). La petrología de las rocas es muy heterogénea, encontrándose también la misma secuencia de la Sierra Madre Occidental, de rocas andesíticas, riolíticas y basálticas en este orden de antigüedad, aunque con muchos cambios. Las andesitas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl han sido reclasificadas como riocitas y dacitas (Schmitter, 1953).

El Municipio de Atlixco se encuentra dentro de una cadena montañosa que corresponde al Eje Neovolcánico, compuesta mayoritariamente por lavas y materiales piroclásticos, aluvión y sedimentos de origen lacustre del Neógeno y Cuaternario; estos últimos no han sufrido perturbaciones desde que se depositaron. El relieve consiste en una serie de planicies escalonadas.

De acuerdo con Álvarez (1962) el área de estudio se encuentra en la Provincia Fisiográfica VII, correspondiente con la zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente.

Esta zona está caracterizada por predominar en ella derrames basálticos y andesíticos, provenientes del volcán Popocatepetl, ya que la región se encuentra en uno de los flancos de éste; por la morfología, orientación y distribución esta situado en una fosa tectónica. El volcán Popocatepetl se encuentra orientado de la misma manera que otros volcanes de la Faja Volcánica Transmexicana en dirección este -oeste; ha generado la formación de grandes volúmenes de rocas efusivas de naturaleza andesítico - basáltica que han sido acumulados por numerosos y sucesivos episodios volcánicos iniciados durante el Paleógeno y continuados hasta el presente.

Para Lugo Hubp (1990), el Sistema Neovolcánico Transmexicano está formado por un sistema de campos volcánicos (conos monogenéticos, lavas y piroclastos); altiplanicies de tefra; superficies de acumulación (proluvial) de piamonte; piamonte de acumulación volcánica; altiplanicies de acumulación lacustre; altiplanicies de acumulación fluvial; altiplanicies de acumulación fluviolacustre; volcanes monogenéticos principales; calderas; estratovolcanes mayores; valles montañosos principales todos de edad cuaternaria.

Para el Neógeno se tiene la formación de estructuras asociadas con otras provincias: montañas, bloque de rocas intrusivas; altiplanicies de riolitas; elevaciones menores constituidas de riolita; montañas constituidas de riolita; lomeríos volcánicos (erosivos); elevaciones plegadas; elevaciones plegadas o de bloque; algunos no fueron diferenciados.

El origen de esta gran estructura conocida también como cinturón, faja, altiplanicie, meseta, eje, sistema, cordillera y sierra, se ha explicado aceptando la teoría de la subducción de la placa de Cocos bajo el continente, con diversos ángulos, lo que explicaría la no coincidencia entre la orientación de la Trinchera Mesoamericana y el Sistema Neovolcánico, teniendo una dinámica de desarrollo en el Cuaternario y en especial en el Pleistoceno tardío-Holoceno, época en que la actividad endógena se manifiesta en grandes superficies con predominio sobre los procesos exógenos niveladores. Así mismo, el volcanismo joven se presenta con mayor intensidad en zonas bien definidas del mismo.

Se reconoce gran diversidad de procesos exógenos antiguos y actuales. En toda la extensión de esta gran provincia, existen lagos actuales y paleolagos con sedimentos más antiguos; valles fluviales, glaciares y formas correspondientes del Pleistoceno tardío y Holoceno; desarrollo de barrancos, prácticamente todos los tipos de procesos de laderas y procesos periglaciales. Todo esta condicionado por la actividad volcánica.

Las riolitas, dacitas, andesitas y traquitas, generalmente se encuentran cubiertas por basaltos, forman la masa principal de las montañas; pero los valles, que originalmente habían sido cuencas lacustres profundas, se han llenado con material fluvial y lacustre derivado de las montañas y con enormes masas de cenizas de los volcanes más recientes.

Para Demant y colaboradores (1976), el relieve del Sistema Neovolcánico Transversal consiste en una serie de planicies escalonadas que se extienden desde cerca de las costas de Colima y Nayarit hasta la región de los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote, en el Estado de Veracruz; aunque geológicamente se extiende hasta las costas del Golfo de México, como proponen varios autores. Dichos autores establecen una subdivisión del Sistema Neovolcánico como resultado de un estudio integrado por información preexistente donde se marcan accidentes tectónicos y geológicos, los más importantes de Oeste a Este son: (1) Fosa de Chapala (Tepic-Chapala), (2) Fosa de Colima, (3) Zona de Michoacán, (4) Valles de Toluca, México y Puebla (cuencas es más apropiado); y (5) Sector Oriental. Esta es una clasificación conveniente, ya que se trata de regiones bien definidas, sobre todo por rasgos morfológicos.

## 2.8 CLASIFICACIÓN Y USO DEL SUELO

El territorio del municipio presenta gran variedad, pues se pueden identificar 5 grupos de suelos<sup>1</sup>, la mayoría se pueden considerar apropiados para las actividades agropecuarias.

Dentro del área predominan los suelos de origen aluvial reciente conocidos como *Fluvisol*, son suelos transportados y depositados por agua, que han sufrido pocas modificaciones. Este suelo es el que mayor extensión ocupa y coincide aproximadamente con las zonas planas del poniente.

Los suelos poco profundos que se encuentran sobre roca dura como rocas volcánicas, están identificados hacia el noroeste y norte, son conocidos como *Litosol*.

Aquellos suelos delgados formados por material no consolidado producto de la alteración de cenizas volcánicas, se encuentran al noroeste y norte coincidiendo con las estribaciones de la Sierra Nevada; también ocupan un área restringida del extremo Sur y son conocidos con el nombre de *Regosol*.

Los suelos oscuros lixiviados que se presentan en las zonas planas del noreste y que ocupan extensiones considerables son conocidos como *Feozem*.

Los suelos de color claro que presentan un cambio en su consistencia debido a la intemperización, son arcillosos y se ubican al extremo noreste cubriendo un área reducida, son llamados *Cambisol*.

Los suelos poco profundos de fertilidad alta en actividades agropecuarias, que se encuentran sobre calizas y están identificados en la mayor parte de las zonas montañosas del sureste se les conoce con el nombre de *Rendzina*.

---

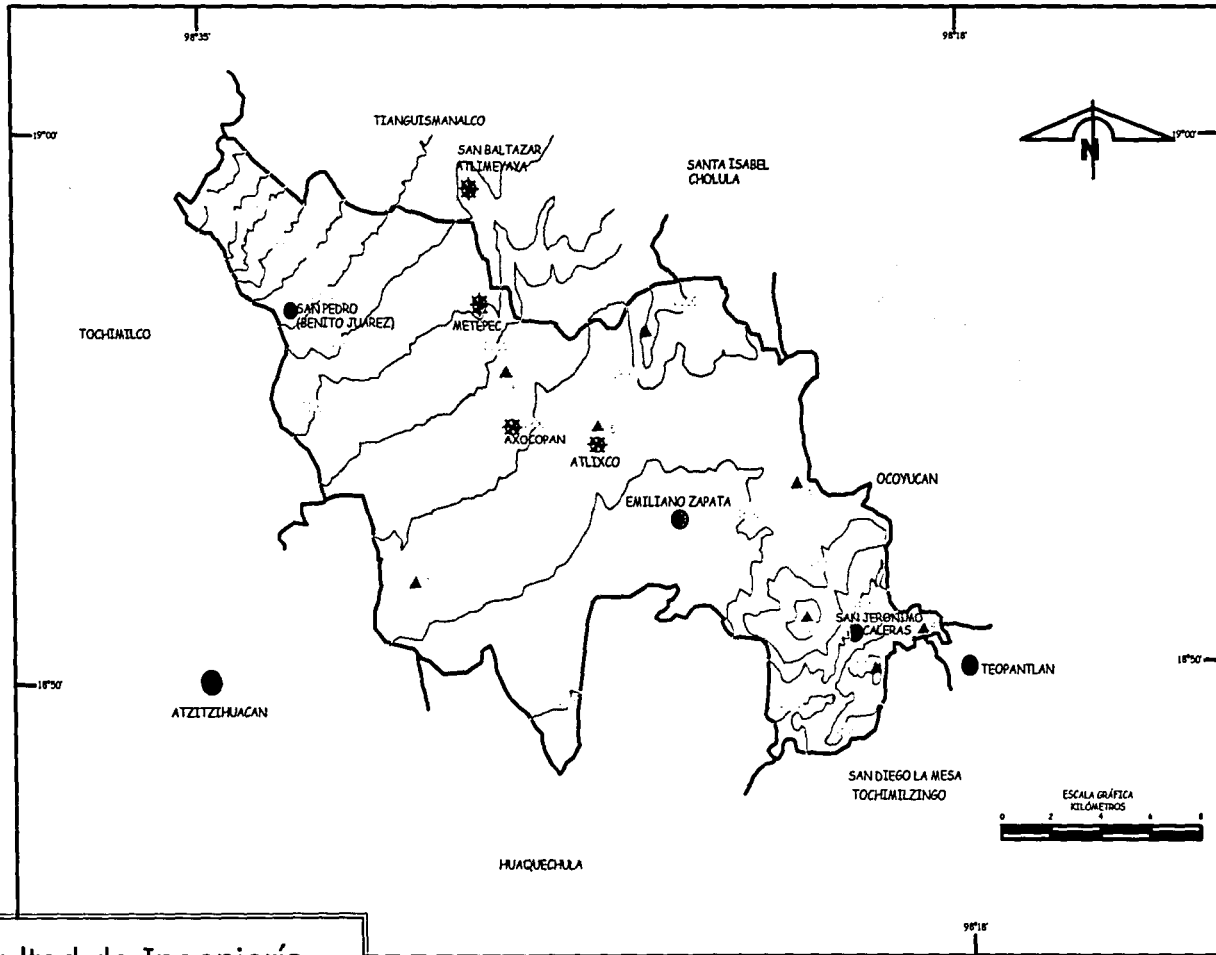
<sup>1</sup> Suelo: La parte de regolita en la cual se encuentran las plantas que tienen raíces.  
regolita: Fragmentos de roca no cementados y los granos minerales derivados de las rocas, que sobreyace a la roca madre en la mayoría de los lugares. La regolita puede ser residual o transportada.

Los suelos que se han originado de rocas areniscas, calizas o ígneas básicas, las cuales al ser intemperizadas forman materiales moderadamente finos (arcillas). Llegan a presentar color gris oscuro o en otras ocasiones pardo. Presenta un alto contenido de arcillas, ocasionando un drenaje lento; se han identificado hacia el suroeste y son conocidos como *Vertisol*.

Hacia la localidad de San Baltazar Atlimeyaya localizada al noroeste del área de estudio, se tiene un suelo de tipo Regosol mezclado con el Litosol. Desde Metepec Abandonado hasta el sur se presentan de 4 tipos de suelos, el Fluvisol, el Regosol mezclado con el Cambisol y con el Feozem. En Atlixco se tiene aluvión y aluvión alterado que conforma el Feozem, y mezclado con el Fluvisol y Vertisol. En los lugares donde afloran las calizas se mezclan el Fluvisol con la Rendzina. Y por último hacia el noroeste, donde afloran las tobas y las brechas volcánicas se tiene el Fluvisol y el Regosol mezclado con el Feozem.

Para la zona de estudio, los suelos no presentan un interés como unidad hidrogeológica por su reducido espesor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Facultad de Ingeniería  
UNAM

INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

OROGRAFÍA




Tesis Profesional

Zaira V. Serrato Sandoval

Figura 4

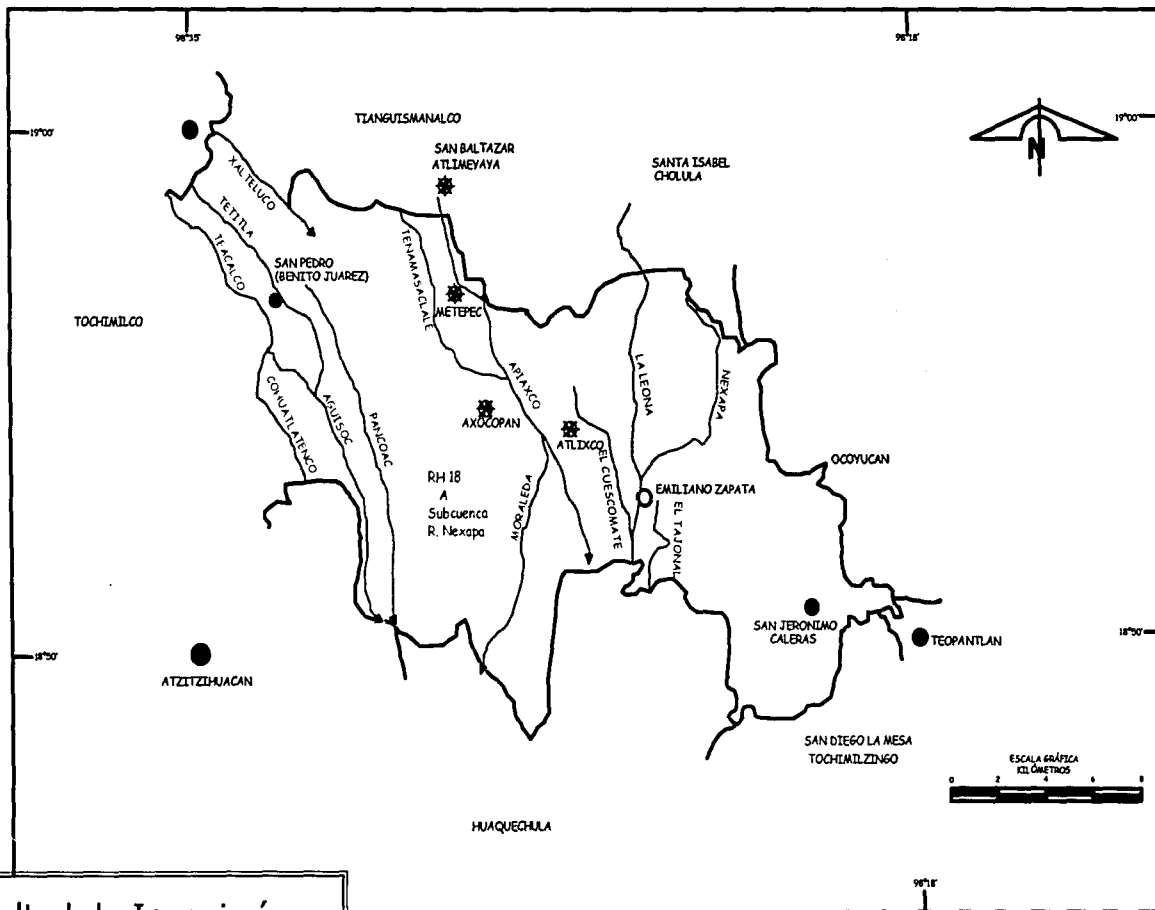
- CERRO**
1. ZOAPILTEPEC
  2. EL CHARRO
  3. TECUITLACUETO
  4. TLACOLTEPEC
  5. SAN MIGUEL
  6. LA TOLVA
  7. LACRUSTEPEL
  8. LA CUATILLERA

**SIMBOLOGÍA**

-  CURVA DE NIVEL
-  ELEVACIÓN PRINCIPAL
-  LOCALIDAD

INEGI. Carta Topográfica, 1:50 000.





<b>Facultad de Ingeniería</b>	
<b>UNAM</b>	
INVESTIGACIONES PARA REINTEGRACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO	
HIDROGRAFÍA	
<b>Tesis Profesional</b>	
Zaira V. Serrato Sandoval	Figura 5

INEGI. Carta Hidrológica Aguas Superficiales,  
1:250 000.  
INEGI. Carta Topográfica, 1:50 000.

SIMBOLOGÍA	
RH 18	REGIÓN HIDROLÓGICA
A	CUENCA DEL RÍO ATOYAC
~	CORRIENTE DE AGUA
●	LOCALIDAD
★	ÁREAS DE ESTUDIO

## CAPÍTULO III

### GEOLOGÍA REGIONAL

#### 3.1 ESTRATIGRAFÍA

Es difícil establecer los tipos de rocas se encontraban en la base del Eje Neovolcánico antes de que este alcanzara su desarrollo en el Plioceno-Cuaternario, que dió lugar a imponentes cuerpos de rocas volcánicas de más de 5,000 metros de altura como son los volcanes de Popocatepetl -Iztaccíhuatl y el Pico de Orizaba.

Evidentemente, nuestro continente permanecía emergido durante el Eoceno, y se estaban erosionando gran parte de las elevaciones cretácicas y rocas ígneas y metamórficas preexistentes.

Demant y otros (1976), consideran una fase ligeramente metamorfizada, del Complejo Cuicateco. La presencia de elementos fósiles indica que la edad del conjunto litológico afectado pertenece al Jurásico-Cretácico. Dicho complejo esta integrado por "lavas almohadilladas" (andesitas), interestratificados con rocas sedimentarias marinas. La relación sedimentológica hace suponer la existencia de una zona de arco insular magmático. Además por la relación de los sedimentos del Cretácico, se cree que pudo haber sido acrecionado tectónicamente. La unidad está formada por rocas sedimentarias que fueron afectadas por metamorfismo dinámico, y que adoptaron texturas gnéissica, cataclástica y blastoclástica. Esta unidad se distribuye en el flanco occidental de la sierra Mazateca. Una segunda fase de edad Oligo-Miocénica que se puede diferenciar en la parte occidental del Eje Neovolcánico, posteriormente una fase Plio-Cuaternaria (la más desarrollada), a diferencia de las secuencias anteriores tiene una disposición Este-Oeste. Toda esta gran provincia volcánica aunque a veces discontinua, constituye una de las masas más extensas de Norteamérica. En la Tabla 1 se muestra la columna estratigráfica del Valle de Atlixco.

De acuerdo con un estudio realizado por la compañía GEOCALLI (1982), para el Valle de Atlixco hace una descripción de las unidades que afloran, las cuales abarcan edades desde el Paleozoico al Reciente.

#### PALEOZOICO (Pz):

Estas rocas afloran en el este y al noroeste del poblado de Izucar de Matamoros, específicamente cerca de los poblados de Santa Ana Necoxtla, San Miguel Ayotla y San Felipe, en donde se encuentran formadas por esquistos, filitas, metaconglomerados, etc. La edad de esta unidad litológica se determinó en base a estudios radiométricos, situándola en el Paleozoico Inferior y son parte de la Formación Acatlán.

---

**MESOZOICO -- CRETÁCICO (K):**

Comprenden las Formaciones Morelos, Cuautla y Mezcala.

**FORMACIÓN MORELOS:** Constituida por una secuencia de calizas y dolomitas de color gris claro, aflora al norte de Izucar de Matamoros, observándose su mayor área de afloramiento al sureste de Cítela. La edad que se le asigna a esta formación es del Albiano Superior – Cenomaniano Inferior.

**FORMACIÓN CUAUTLA:** Aflora al este del poblado Tepexco en donde se puede observar en el corte de la carretera, que une a la ciudad de Cuautla con Izucar de Matamoros, una secuencia formada por capas de caliza arcillosa de color gris oscuro a negro con espesores de estratos que varían de 10 a 50 centímetros intercaladas con bandas de pedernal negro; en este lugar se encuentra intrusionada por diques no cartografiados pertenecientes a la Formación Tepexco.

**FORMACIÓN MEZCALA:** Los afloramientos de esta formación son escasos y pequeños; en el poblado de Clameca se encuentran afloramientos constituidos por lutitas y limolitas calcáreas de color amarillento en capas delgadas, fracturadas y con alteración, subyaciéndola se tiene a la Formación Cuautla y está cubierta por el Grupo Balsas (conglomerados rojos) y por conglomerados andesíticos del Grupo Tlayecac.

Al sureste de San Nicolás Tenexcalco, se localiza otro afloramiento de esta formación; en esta parte se encuentra constituido por margas. Limolitas y lutitas de color verde amarillento muy alterados. Por su contenido faunístico se le asigna una edad del Campaniano.

**CENOZOICO:**

**Tc. GRUPO BALSAS:** Este grupo aflora predominantemente en la parte suroriental y en menor proporción en la porción occidental, en donde se encuentra descansando sobre rocas del Cretácico o más antiguas como las que afloran al este de Izucar de Matamoros, Puebla, donde descansa sobre los esquistos Acatlán. Está constituida por tobas, lutitas, limolitas calcáreas y conglomerados rojos.

**Tvr. FORMACIÓN TLAICA:** Los afloramientos pertenecientes a esta formación son muy pequeños y aislados, encontrándose al sur del área de estudio, específicamente en las cercanías del poblado de Tlancualpican, donde se encuentra representado por tobas riolíticas de color rosa claro y brechas. Otros pequeños afloramientos se encuentran al norte de Temascalipa y en el corte de la carretera Cuautla – Izucar de Matamoros, aproximadamente a 6 kilómetros al occidente del poblado de Cuaxpala.

*TI. FORMACIÓN CUAYUCA:* Las rocas de esta unidad afloran en gran parte del valle, presentando su mayor área de afloramiento en la parte central y oriental; la unidad está constituida por capas de lutitas, limolitas calcáreas y areniscas con intercalaciones de yeso de color crema claro de unos 30 centímetros de espesor. Ubicado a 3 kilómetros al occidente de la carretera de Izucar de Matamoros, se pueden observar a detalle las características de esta formación, así como un mínimo grado de plegamiento, presentan un echado suave la mayoría de los afloramientos observados.

*Tvab. y Tvb. GRUPO TEPEXCO Y FORMACIÓN TLAYECAC:*

Dentro de este grupo se encuentran derrames lávicos y materiales vulcanoclásticos pertenecientes al Grupo Tepexco y a la Formación Tlayecac. Los afloramientos de estas unidades se presentan principalmente en la zona norte y en menor proporción en la parte suroccidental. El Grupo Tepexco en el área de estudio se encuentra constituido por derrames de lava de composición andesítica y brechas andesíticas; en lo referente a la Formación Tlayecac se encuentra formada por tobas híbridas constituidas por fragmentos principalmente andesíticos, mal clasificados, empacados en una matriz tobácea.

*Qavb. GRUPO CHICHINAUTZÍN:*

Se encuentra constituido por derrames de lava de composición basáltica y andesítica, provenientes del volcán Popocatepetl. Los afloramientos de roca pertenecientes a este grupo se localizan únicamente en la parte noroeste de la zona de estudio, formando parte de las faldas del propio aparato volcánico.

*Qdc. MATERIALES CLÁSTICOS DE ORIGEN VOLCÁNICO:*

Se encuentra únicamente en la parte baja del valle, constituyendo el relleno del valle de Cítela – Atencingo – Escape Lagunillas. La secuencia está formada por guijarros y gravas de procedencia predominantemente basáltica y andesítica empacados en arenas y arcilla. Su grado de compactación es muy variable, resultando ser por lo general de buena permeabilidad. Representa el acuífero explotado en esa área.

*Qal. ALUVIÓN:*

Consiste en arena, grava y arcilla los cuales se encuentran distribuidos en gran parte de la zona estudiada, estos sedimentos rellenan las áreas del valle a excepción de las planicies de inundación del propio cauce del río Nexapa, donde constituye acuíferos de interés. Dentro del área de estudio se tiene poca extensión superficial y su espesor no excede de 0.60 metros.

TABLA 2. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL VALLE DE ATLIXCO - IZUCAR DE MATAMOROS

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDAD EN ETAPA	DESCRIPCIÓN
<b>CENOZOICO</b>	<b>CUATERNARIO</b>	<b>HOLOCENO</b>	<b>Qal</b>	<b>Aluvi6n:</b> <b>Gravas, arenas, limos y arcillas.</b>
			<b>Qdc</b>	<b>Clastos de Origen Volcánico:</b> <b>Conglomerado formado por clastos de basalto y andesita, con bajo porcentaje de arenas y arcillas.</b>
		<b>PLEISTOCENO</b>	<b>Qvab</b>	<b>Derrames lávicos:</b> <b>Derrames lávicos de composici6n basáltica y andesítica. Grupo Chichinautzín.</b>
	<b>NEÓGENO</b>	<b>PLIOCENO</b>	<b>Tvab</b> <b>Tvb</b>	<b>Materiales Volcánicos:</b> <b>Derrames lávicos, materiales vulcanoclásticos (tobas, brechas y lahares) de composici6n basáltica y andesítica. Pertenecen al Grupo Tlayecac y Tepexco.</b>
			<b>TI</b>	<b>Sedimentos Lacustres:</b> <b>Se tiene 2 facies, una arcillosa y otra yesífera con alternancia de limolitas y calizas arcillosas.</b>
			<b>Tvr</b>	<b>Sedimentos Vulcanoclásticos:</b> <b>Tobas y brechas riolíticas de la Formaci6n Tlaica.</b>
	<b>PALEÓGENO</b>	<b>OLIGOCENO</b> <b>EOCENO</b> <b>PALECENO</b>	<b>Tc</b>	<b>Dep6sitos continentales:</b> <b>Tobas, lutitas, limolitas calcáreas y conglomerado rojo. Grupo Balsas.</b>
	<b>MESOZOICO</b>	<b>CRETÁCICO</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>Ki</b>
<b>PALEOZOICO</b>	<b>DEVÓNICO</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>Pz-Met.</b>	<b>Rocas Metam6rficas:</b> <b>Metasedimentos, metavolcánicos, esquistos de cuarzo, filitas, grauvacas, etc. Complejo Acatlán.</b>
	<b>SILÚRICO</b>			
	<b>ORDOVÍCICO</b>			

LOS DATOS DE LA COLUMNA ESTRATIGRÁFICA FUERON TOMADOS Y MODIFICADOS DE LA CARTA GEOLÓGICA ESC. 1:50,000 DEL MUNICIPIO DE ATLIXCO (E14-B52), Y DE LA COLUMNA GEOLÓGICA GENERALIZADA, DEL CONSEJO DE RECURSOS MINERALES (MONOGRAFÍAS GEOLÓGICO-MINERAS).

De acuerdo con González Huesca, 2000, quien realizó "Estudios de detalle estratigráfico y sedimentológico del Lahar de San Nicolás en el Flanco Noreste del volcán Popocatepetl" y con lo muestreado en campo (Figura 7), se puede afirmar que la unidad esta constituida por rocas volcánicas de composición andesítica, del cual uno de los derrames se prolonga hasta Axocopan como una angosta tira en comparación con el gran cuerpo que se tiene en San Baltazar Atlimeyaya. El mismo autor describe la fuente de origen de estas rocas de las siguiente manera:

En el siglo antepasado y pasado se tienen evidencias de la ocurrencia de varias corrientes de lava en el cuadrante noreste del Popocatepetl (Aguilera y Ordoñez, 1895), las cuales Fuentes (1975), mencionó que eran de composición andesítica a basáltica y constituyen la materia prima para la construcción de viviendas y tallado de diferentes tipos de artesanías de la región.

El estudio de estas lavas es importante, ya que se encuentran asociadas a los depósitos del Lahar de San Nicolás; el origen de estos flujos de lava se encuentra asociado a una fisura en la porción Este del volcán Popocatepetl, la cual se encuentra a una altitud de 3400 metros sobre el nivel del mar (Siebe et al, 1995, Macías et al, 1995).

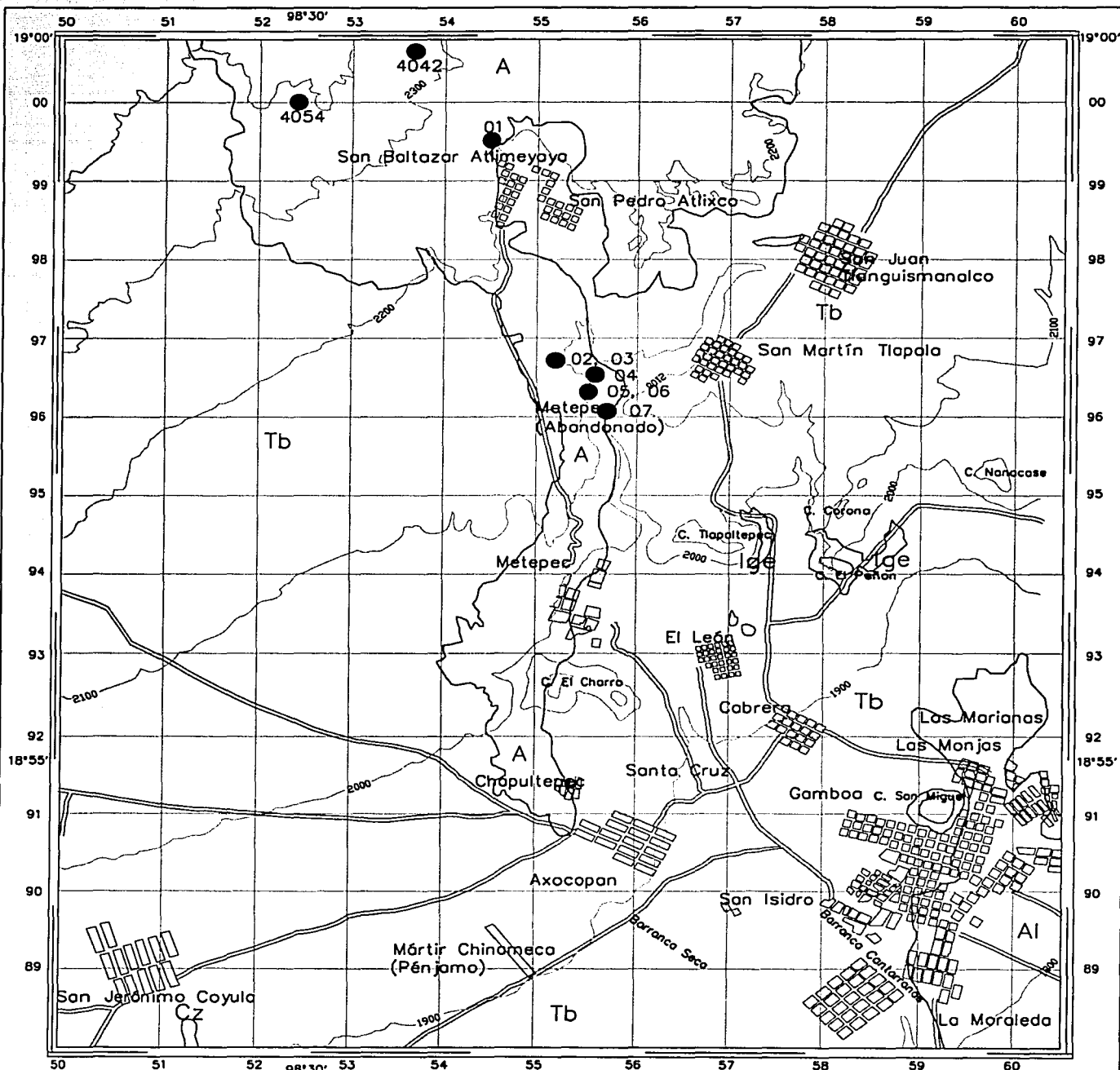
Las lavas se han clasificado como Andesitas, se componen de fenocristales de plagioclasa, ortopiroxeno, clinopiroxeno y hornblenda en una matriz afanítica, las cuales se caracterizan por la cantidad de xenolitos incluidos, la mayoría de olivino, rocas evaporíticas, granulitas y rocas ultramáficas (Siebe et al, 1995).

Debido a su espesor (cerca de 20 metros), su superficie rugosa y la presencia de grandes vesículas elongadas, los flujos de lava se pueden clasificar como del tipo AA.

En lo que respecta al origen del Lahar de San Nicolás (LSN), puede estar asociado con una erupción pliniana, la cual provocó la destrucción de un domo de lava que ocupaba y rellenaba el cráter del volcán Popocatepetl (es posible también que con el aporte de nuevo material lávico las paredes del domo se hayan tornado inestables), dando origen a los productos fragmentados que se mezclaron con el agua resultante de la fusión del glaciar (en una porción aproximada de 2/3 partes de productos volcánicos fragmentados y 1/3 parte de agua), originando de este modo que el delgado depósito de cenizas grises se ubicara por debajo de los depósitos del LSN; la energía de este flujo fue de tal magnitud que logró alcanzar el primer contrafuerte topográfico del volcán Iztaccíhuatl lo saltó y lo erosionó dejando una incisión antes de virar casi en ángulo recto hacia el sureste (Delgado Brugman, 1995; Macías et al, 1995), y continuar su recorrido que fue más de 60 kilómetros a partir de su fuente de origen antes de diluirse; posiblemente a bajo de la costra de rocas andesíticas se encuentre el LSN.

El resultado de la revisión de la información disponible permitió inferir un resultado lógico y congruente con lo observado en superficie: una capa de andesitas corona un muy grueso paquete de tobas alternadas con granulometría variable.

En la Tabla 2, se hace la descripción del análisis petrográfico de las muestras recolectadas en campo, así como también se realiza la descripción hecha en la unidad que se encuentra en la localidad de San Baltazar Atlimeyaya reportada por González Huesca, 2000, correspondientes al "Estudio de detalle estratigráfico y sedimentológico del LSN en el flanco noroeste del volcán Popocatepetl". En la figura 6, se tienen los puntos de los muestreos hechos por el anteriormente mencionado, así como los realizados para este estudio. Se confirma que los derrames en el poblado San Baltazar Atlimeyaya son extensos, uno de estos llega hasta Axocopan como una angosta tira, es de rocas andesíticas.



Facultad de Ingeniería  
 U N A M  
 INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN  
 DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO  
 MUESTREO  
 Tesis Profesional  
 Zaira V. Serrano Sandoval      Figura 6

- |                          |                    |
|--------------------------|--------------------|
| ● ANDESITA<br>4054       | ● TOBA<br>04, 05   |
| ● ANDESITA<br>4042       | ● CENIZA<br>06, 07 |
| ● ANDESITA<br>01, 02, 03 |                    |





TABLA 2. PETROGRAFÍA

LOCALIDAD	MUESTRA	TEXTURA	MINERALOGÍA	CLASIFICACIÓN	OBSERVACIONES
San Baltazar Atlimeyaya	01	Porfídica Mesocristalina	E: Andesina, Oligoclasa, Vidrio. P: Augita, Pigeonita, Min. Opacos. S: Hematita - Limonita, Min. Arcillosos.	Andesita de píroxeno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz microlítica con vidrio</li> <li>• Plagioclasas con zoneamiento inverso</li> <li>• Vidrio de composición ácida</li> <li>• Matriz oxidada</li> </ul>
Metepec Abandonado	02	Porfídica Mesocristalina Glomeromorfídica	E: Andesina, Oligoclasa, Vidrio. P: Augita, Hornblenda, Pigeonita, Min. Opacos. S: Minerales arcillosos	Andesita de píroxeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz microlítica con vidrio</li> <li>• Plagioclasas con zoneamiento inverso</li> <li>• Vidrio de composición ácida</li> </ul>
Metepec Abandonado	03 (pillow-lava)	Porfídica Mesocristalina Glomeromorfídica	E: Andesina, Oligoclasa, Vidrio A: Augita, Hornblenda, Min. Opacos S: Min. Arcillosos hematita - limonita.	Andesita de píroxeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz microlítica</li> <li>• Vidrio de composición ácida</li> </ul>
Metepec Abandonado	04	Piroclástica	P: Vidrio, Cuarzo, Andesina, Oligoclasa, Min. Opacos, Biotita, Apatito S: Hematita - Limonita, Min. Arcillosos	Toba vitreocristalina de composición dacítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidrio en matriz</li> <li>• Tamaño promedio 50 micras</li> <li>• Vidrio ácido</li> <li>• Restos orgánicos</li> </ul>
Metepec Abandonado	05	Piroclástica	P: Vidrio, Andesina, Fragmentos de Pumicita, Min. Opacos S: Hematita - Limonita, Min. Arcillosos	Toba vitreocristalina de composición andesítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor contenido de matriz vítrea</li> <li>• Tamaño promedio 40 micras</li> </ul>
San Baltazar Atlimeyaya	06		Fragmentos de andesitas (mayor contenido) y toba Biotita, Min. Opacos, Andesina, Oligoclasa, Hornblenda	Ceniza	
Metepec Abandonado	07		Fragmentos de andesita y de toba, Esfena, Andesina, Oligoclasa, Hornblenda y Min. Opacos	Ceniza	
San Baltazar Atlimeyaya	4042	Porfídica Hipocristalina Inequigranular	E: Fenocristales de plagioclasa (Andesina), Orto y Clino-píroxeno, Hornblenda, Min. Opacos A: Esfena, Apatita S: Óxido de hierro	Andesita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los cristales de la matriz son de forma acicular</li> <li>• Se encuentran oxidados</li> </ul>
San Baltazar Atlimeyaya	4054	Porfídica Hipocristalina Inequigranular	E: Fenocristales de plagioclasa (Andesina), Orto y Clino-píroxeno, Hornblenda, Min. Opacos A: Esfena, Apatito S: No se encontraron	Andesita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los cristales de la matriz son de forma acicular</li> </ul>

E: MINERALES ESENCIALES P: MINERALES PRIMARIOS A: ACCESORIOS S: MINERALES SECUNDARIOS

Las muestras de la 01 a la 07 fueron estudiadas por la autora de este trabajo y la 4042 y 4054 fueron tomadas de la Tesis Profesional, González Huesca A., 2000; "Estudios de detalles estratigráfico y sedimentológico del Lahar de San Nicolas en el flanco noreste del volcán Popocatepetl".

### 3.2 MARCO TECTÓNICO REGIONAL

El territorio poblano comprende una de las regiones tectónicas más complejas del país. La complejidad estructural y estratigráfica de esta zona hace difícil la reconstrucción paleogeográfica y tectónica que permita una explicación clara sobre el origen y evolución de los rasgos que caracterizan a este sector.

Actualmente, este sector del país, al formar parte de la margen suroccidental de la placa Norteamericana, queda localizado dentro de una zona tectónica activa relacionada con el límite convergente entre dicha placa y la de Cocos.

Las rocas más antiguas que se encuentran en el territorio del estado de Puebla están constituidas por dos ventanas precámbricas de rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Oaxaqueño; sobre las mismas descansan discordantemente las rocas metamórficas del Paleozoico inferior pertenecientes al Complejo Acatlán. Algunos autores interpretan al Complejo Acatlán vinculado con la apertura y cierre de un océano Protoatlántico (de Cserna, 1981 y Ortega – Gutiérrez 1981). El basamento aflora únicamente hacia la parte sur del estado, en la zona limítrofe con el estado de Oaxaca; las rocas metamórficas están cubiertas discordantemente por rocas de origen deltáico continental del Paleozoico superior (Formación Matzitzi).

El Mesozoico está representado por una secuencia sedimentaria marina y continental que va del Triásico Superior al Cretácico Superior, así como por una secuencia de rocas vulcanosedimentarias y rocas miloníticas.

El Cenozoico está formado por rocas volcánicas y sedimentarias de origen continental.

- **PRECÁMBRICO (Pe):** Las rocas precámbricas conocidas en el estado de Puebla pertenecen al Complejo Oaxaqueño y fueron descritas por vez primera por Aguilera (1896) y Ordóñez (1906). Los trabajos de Fries y colaboradores (1962) son los primeros que mencionan estudios radiométricos de las rocas del basamento metamórfico (colectadas en la región de Nochixtlán, Oaxaca). Dichos estudios consignan edades variables entre 1,100 y 900 millones de años. El contacto superior es siempre discordante y el contacto inferior no está expuesto.

La base metamórfica que constituye al Complejo Oaxaqueño, es considerada como el resultado del primer ciclo tectónico registrado en rocas cristalinas del sur de México. Se ha interpretado como la evolución de una zona de cizalla con sedimentación en corteza continental, con el posterior metamorfismo a facies de granulita en una evolución ensiálica o por colisión continental (Ortega-Gutiérrez, 1981).

Se bosqueja al complejo Acatlán en terrenos del dominio circumpacífico cordillerano acrecionado al Complejo Oaxaqueño (cratón precámbrico de América del Norte).

- **PALEOZOICO:** Las rocas paleozoicas que afloran en el estado de Puebla se localizan principalmente en el sector sudoccidental de la entidad, en la colindancia con los estados de Oaxaca y Guerrero. Estas rocas han sido consideradas de edad premississípica, distinguiéndose dos unidades: una metasedimentaria (Formación Cosoltepec) y otra de origen magmático (Formación Xayacatlán).
- **MESOZOICO:** El Mesozoico en la entidad está representado por unidades que corresponden a rocas de origen continental y marino del Triásico Superior, Jurásico Inferior, Medio y Superior, así como del Cretácico Inferior y Superior; se distribuyen tanto en la provincia del Cinturón Mexicano de pliegues y fallas como en la provincia Sierra Madre del Sur, estando los tres primeros períodos bien representados en localidades específicas dentro del estado, mientras que el Cretácico está ampliamente distribuido en todo el estado. Las rocas de esta edad afloran en los límites con los estados de Veracruz y Oaxaca.
- **CENOZOICO:** Las rocas pertenecientes a esta era comprenden al Paleógeno inferior marino; Neógeno continental y el Neógeno volcánico, así como unidades del Cuaternario, las cuales se encuentran ampliamente distribuidas en la entidad, sobre todo en el sector centroseptentrional.
- **NEÓGENO VOLCÁNICO (Ige):** La actividad volcánica más importante de México comenzó a finales del Paleógeno y continuó hasta el Plioceno-Cuaternario (Demant, 1979), dando lugar al emplazamiento de grandes volúmenes de rocas y materiales efusivos que cubren una gran superficie en las porciones oriental, nororiental y occidental del estado de Puebla.

Esta actividad volcánica está relacionada básicamente con la formación de la Faja Volcánica Transmexicana. Esta unidad se correlaciona con la unidad (Tv) del estado de Hidalgo.

Inicialmente, el vulcanismo fue de composición basáltico-andesítica y dacítico. Dichas rocas son las que constituyen los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, así como el cerro Derrumbadas y la caldera de Teziutlán (Los Humeros).

En el sur del territorio del estado de Puebla, las rocas ígneas extrusivas consisten esencialmente en basaltos y tobas líticas; estos materiales fueron emplazados en zonas de debilidad cortical y pueden estar relacionados con fallamientos post-orogénicos o bien a zonas de debilidad asociadas a la actividad magmática de la Faja Volcánica Transmexicana. Las rocas ígneas extrusivas de composición más ácida afloran principalmente en los sectores centro y norte del territorio poblano y están representadas por tobas dacíticas y tobas riolíticas caolinizadas.

En áreas aledañas a los límites con el estado de Veracruz estas rocas han sido fechadas por métodos radiométricos y aportan edades que varían del Mioceno ( $17.0 \pm 0.6$  millones de años) al Plioceno (1.8 millones de años.) (Mooser y Soto, 1980; Cantagrel y Robin, 1981; y Negendank et al., 1985). Estas rocas cubren discordantemente a las formaciones cretácicas.

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad CFE (1990), las zonas de vulcanismo son también zonas de fracturamientos. Tales fracturamientos deben ser del tipo tensional, ya que los magmas solamente pueden surgir de las profundidades en áreas de tensión cortical. Efectivamente, la zona Neovolcánica Transmexicana, con un ancho de unos 120 kilómetros, representa una faja de hinchamiento creada por el ascenso de magmas y consecuentemente por el calentamiento de la corteza. El flujo de calor hacia la superficie se estima dentro de la zona volcánica en el doble de lo normal. Así, resulta que a unos 15 kilómetros de profundidad, prevalecerá una temperatura de  $1000^{\circ}$  a  $1500^{\circ}$  C, lo cual define el nivel en que la corteza deja de ser frágil y se vuelve dúctil; hasta este nivel puede estimarse que las fallas superficiales se extienden a profundidad.

Haciendo un análisis de los distintos fracturamientos que se reconocen en el área, comenzando con la Orogenia Laramídica que comprimió y plegó los depósitos marinos mesozoicos y generó importantes cabalgaduras, sobrevino en el Cenozoico un largo tiempo de tensiones corticales acompañadas de vulcanismo. Primero se produjo el arco volcánico del Oligoceno con estructuras N-S. Al cambiar la subducción de la costa del Pacífico oriental a la costa meridional de México en el Mioceno Inferior, se fueron formando los arcos del Mioceno, con estructuras dirigidas W-E. En el Plioceno se generó el Arco Tarasco con fracturamientos dirigidos al ESE. A partir del Cuaternario entró en actividad el Arco del Chichinautzín. En esta última fase del vulcanismo cenozoico los fracturamientos y fallas del Arco Volcánico Tarasco provienen del poniente y describen un gran arco cóncavo al sur. Vistas en conjunto, las fracturas y fallas de este tipo parecen corresponder a la prolongación oriental de lo que se reconoció como Arco Tarasco (Mooser, 1969). Este fracturamiento rige buena parte del vulcanismo desde el Plioceno Superior hasta el Cuaternario Medio. La fosa de Atlixco mantiene un rumbo al NNE que se prolonga hasta Puebla y probablemente rige en parte tectónicamente a La Malinche, así como fracturamientos en los núcleos de las sierras de las Cruces y Nevada. La formación de esta fosa puede estar ligada a la expansión pleistocénica general de la Faja Volcánica. Es posible que coincidan con la Fosa de Acambay.

### 3.3 GEOLOGÍA HISTÓRICA

De acuerdo con Morán-Zenteno (1990), el territorio poblano comprende parte de la región más compleja del marco geológico del sur de México.

Se bosqueja al Complejo Acatlán en terrenos del dominio circumpacífico cordillerano acrecionado al Complejo Oaxaqueño (cratón precámbrico de América del Norte), en el Paleozoico Superior.

Durante el Mississípico-Pérmico se desarrolló sobre el basamento una sedimentación costera-marina de aguas someras que dio lugar al depósito de la Formación Matzitzí y Patlanoaya, del Paleozoico Superior.

Durante el lapso del Neógeno al Jurásico Medio ocurre un fracturamiento intracratónico asociado a la apertura del Golfo de México, el cual produce un sistema de fallas en bloque (horsts y grabens) lo cual da origen a la formación de cuencas continentales y locales (Paleobahía de Tlaxiaco).

A principios del Jurásico Tardío, las condiciones tectónicas prevalecientes en el sur del territorio mexicano adquieren una mayor tranquilidad, iniciándose un extenso lapso transgresivo que produce una sedimentación eminentemente marina, misma que se interrumpe drásticamente al generarse, a fines del período, una emersión de la porción central de la Paleopenínsula de Oaxaca.

Durante el Cretácico Temprano, se estabiliza la emersión y se inicia una etapa de subsidencia, provocando en los altos que rodeaban la porción central de la Paleopenínsula de Oaxaca, una sedimentación de tipo nerítico-costera y una sedimentación propia de un ambiente de aguas profundas.

A principios del Cretácico Tardío empieza a manifestarse un levantamiento de la porción occidental - suroccidental del continente por efecto de las primeras pulsaciones tectónicas de la orogenia Laramide.

A fines del Cretácico Tardío y principios del Paleógeno, se origina en la región la fase tectónica más intensa de la orogenia Laramide, plegando, deformando y fallando la columna sedimentaria depositada hasta el Cretácico Superior. A continuación del evento orogénico laramídico, tiene lugar una etapa de extensión productora de grandes pilares y fosas limitadas por fallas y fracturas, a través de las cuales son emplazadas las rocas volcánicas pertenecientes a esta época.

En el Cuaternario se reconoce otro sistema de fracturamiento y fallamiento normal acompañado por derrames ígneos extrusivos, como resultado de la subducción que sufre la corteza oceánica (placa de Cocos), al suroeste de México.

### 3.4 GEOLOGÍA LOCAL

Las características de las rocas e información de puntos de verificación se obtuvieron del informe geológico "Investigación sobre las posibilidades de Reinfiltrar agua al Valle de Atlixco", F.I. UNAM, 1998. Posteriormente esta información se complementó con trabajo de campo.

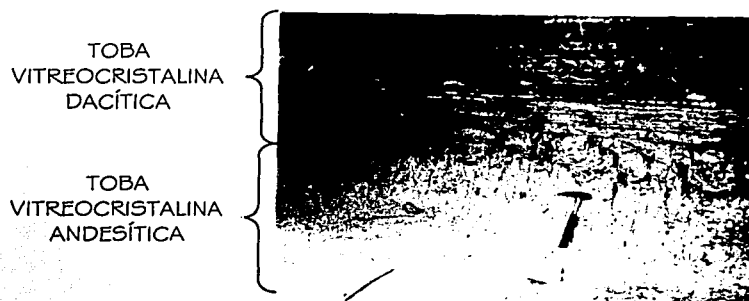
En el área de estudio podemos identificar tres tipos de rocas diferentes (Figura 15). La de distribución espacial más extensa, agrupa fragmentos o clastos de roca arrojados por el volcán, muchos de ellos en forma incandescente.

Las dimensiones de estos fragmentos varían desde partículas de vidrio (cenizas), hasta otros mayores de 0.50 metros de diámetro (bombas o bloques); otros son del tamaño de lapilli.

Dentro de este paquete de clastos volcánicos se diferencian capas que guardan entre sus límites fragmentos del mismo tamaño, aunque ocasionalmente se encuentran otros mayores o menores.

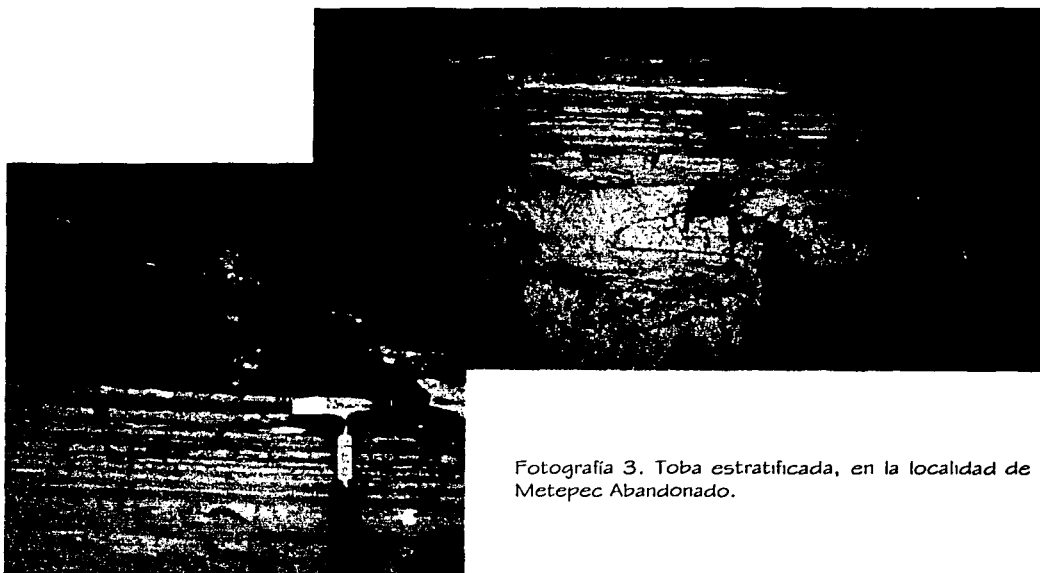
Una de estas capas está formada preponderadamente por fragmentos de rocas menores, del tamaño de las arcillas y los limos (menores a 1/256 milímetros y entre 1/256 a 1/16 milímetros de diámetro respectivamente) que se clasificó como toba pumítica. En algunos afloramientos se encuentran embebidos entre los limos y las arcillas algunos gránulos (2 a 4 milímetros) y hasta guijas, guijarros y otros mayores que alcanzan los 64 milímetros de diámetro; esta unidad presenta color café amarillento y ha sido clasificada como una toba vitrocristalina de composición andesítica. La otra unidad presenta estratificación y tiene un color crema claro al fresco, y esta ha sido clasificada como toba vitrocristalina de composición dacítica.

En la fotografía 2 se observa estratificación que presenta la toba vitrocristalina de composición dacítica, así como la toba vitrocristalina de composición andesítica que se encuentra subyaciendo a la estratificada. Los espesores de ambas tobas varían entre tres y seis metros.



Fotografía 2. Tobs vitrocristalinas, en la localidad de Metepec Abandonado.

La toba vitreocrystalina de composición dacítica fotografía 3, presenta un color pardo claro a blanco por intemperismo, con partículas extremadamente finas. El rumbo y echado es NE45°;13°.



Fotografía 3. Toba estratificada, en la localidad de Metepec Abandonado.

Al hacer el análisis microscópico de estas tobas se encontraron restos de microfósiles, de acuerdo al tipo de estructura que presentan son clasificadas como Diatomeas pennales; son algas unicelulares de composición sílica. Forman parte importante del plancton de aguas frescas que por lo general viven a la orilla de lagos. Estas algas se pegan a los sedimentos de los litorales y pertenecen al Pliopleistoceno.

Una de las características de este tipo de Diatomeas pennales es que cuentan en su estructura con un nódulo central y rafe (Microfotografía 4).

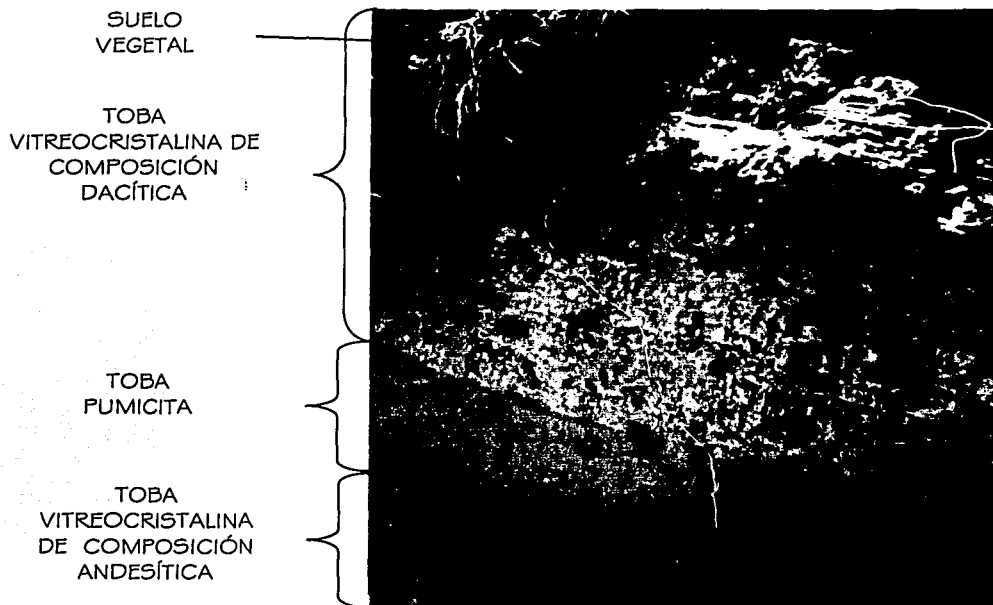


Microfotografía 4. Muestra una Diatomea pennal.

Por lo anterior se puede inferir que durante el depósito de esos materiales el lugar era un lago donde se depositaron las cenizas. Ahora únicamente se encuentra un río, el cual es alimentado por las lluvias y deshielos del Popocatepetl, que descargan sus aguas en los manantiales de San Baltazar Atlimeyaya y Metepec Abandonado.

Otra capa que se distingue muy bien en el área, es aquella que está formada por fragmentos del tamaño de las arenas gruesas (1/16 a 2 milímetros de diámetro), de color blanca, clasificada como "toba pumítica", "toba pumicita" o "pómez". Los espesores de estas capas varían de 0.50 metros a 1 metro (Fotografía 5).

En la fotografía 5 se observan los 3 tipos de rocas descritos anteriormente.



Fotografía 5. ESTRATIFICACIÓN DE TOBAS

En conjunto, a las tres capas se denominan en este trabajo tobas, piroclásticos o volcanoclásticos. Las dos primeras, tobas vitrocrystalinas y pumicitas, representan diferentes grados de energía de emisión volcánica y están dispuestas en el área en una columna que indica han ocurrido de diferentes emisiones separadas por tiempos desconocidos. Su mejor expresión en el área es el Cerro de San Miguel en el centro del Municipio de Atlixco.

Otra capa que aflora extensamente en el área, está compuesta por clastos de todos tamaños; desde arcillas hasta fragmentos de 3 o 4 metros de diámetro. Son originadas por avalanchas de lodo, deslizamientos de taludes y laderas inestables.



A su paso estas corrientes de lodo acarrean y aglutinan a todos los fragmentos sueltos (también desintegran riscos o salientes), que encuentran en su descenso. Estas capas tienen mayor espesor que las dos anteriores, se encuentran muy compactas y corresponden con "lahares", estas se pueden observar en la noria de prueba cerca del pozo Las Palmas. Posiblemente este lahar forme parte del Lahar de San Nicolás.

Las demás rocas que afloran en el área, son basaltos y andesitas, y otras variedades de rocas de composición intermedia. Por su contenido de sílice son conocidas también como básicas (basalto, las de menor cantidad) e intermedias (andesitas, las que afloran en mayor proporción). Su expresión morfológica en el área corresponde con derrames o coladas que descienden desde la base del volcán. Uno de estos derrames se prolonga hasta Axocopan como una angosta "tira" de rocas andesíticas en comparación con el más amplio cuerpo de Atlimeyaya. Estas rocas presentan un color gris oscuro y un denso fracturamiento (diaclasas).

Los frentes (lugar máximo donde alcanzó a escurrir la lava antes de solidificarse), de estas emisiones lávicas, presentan aspectos brechoides (peñascos y fragmentos de diferentes tamaños, angulosos y redondeados intermezclados). Las mejores exposiciones de éstas rocas se encuentran en San Baltazar Atlimeyaya y en la Barranca de Metepec.

Otros materiales que afloran en la zona es una mezcla suelta de limos, arcillas, gravas, arenas y cantos rodados, clasificados como aluvión. La cobertura superficial que se encuentra encima de las tobas, basaltos y andesitas es el producto del intemperismo y erosión. El área tiene extensión superficial limitada y su espesor no excede de 0.60 metros.

De la continuidad y distribución vertical en el subsuelo de las rocas descritas anteriormente, se conoce muy poco. La información proporcionada por SOAPAMA consta sólo de dos cortes litológicos de pozos: Prados León y San Pedro Benito Juárez con sus correspondientes registros eléctricos. Se tuvo acceso también a otros cuatro registros eléctricos: pozos colonia Valle Sur, "La Alfonsina", "San Alfonso"(reposición) y "Cerril Xalpatlaco" perforado para FOVISSTE, pero que no cuentan con sus respectivos cortes litológicos. Aquí conviene mencionar que un registro eléctrico sin corte litológico es lo que en el argot geofísico se llama "aire", pues no hay elementos contra los cuales se puedan calibrar los valores de resistividad y potencial natural. A estas limitantes se agrega otra: los dos cortes litológicos fueron hechos por los dos perforistas y/o sus ayudantes y no por un geólogo. El resultado de esto no es afortunado, porque la descripción de los materiales cortados durante la perforación no se refiere a su composición, sino principalmente a su perforabilidad. Las descripciones de "compacto" y "semicompacto" son las que predominan, y ocasionalmente se mencionan los de "arena" y "grava". Por si esto fuera poco, los dibujos de los cortes litológicos no tienen escalas, por lo que su comparación con el registro eléctrico no es confiable. Bajo estas carencias, sólo se hacen suposiciones basadas en el conocimiento que se tiene de la geología superficial y de algunos informes que se tienen del valle situados a 14 kilómetros al sur del área de estudio.

La insuficiente información del subsuelo, impide conocer la ocurrencia o no, de derrames de lavas basálticas o andesíticas entre las capas de tobas y lahares, que es una información fundamental para conocer el modelo de funcionamiento del valle. A este respecto, en el registro eléctrico del pozo "La Alfonsina" está anotado al margen "medio tipo secundario rocas fracturadas" (sic<sup>2</sup>), entre los 67 y 77 metros de profundidad. La dureza parece corresponder con la resistividad (2500) ohms por metro, pero ante la ausencia de corte litológico formado por el especialista y la bitácora de perforación, también puede inferirse que se trate de una capa de lahar.

La compañía PEGSA y GEOCALLI realizaron estudios geohidrológicos sobre el valle en 1969 y 1982 respectivamente. En el último estudio se hizo Geofísica con el fin de poder correlacionar algunas formaciones geológicas y geohidrológicas, basándose en datos de pozos y de geología superficial. Con los cortes litológicos y datos proporcionados por SOAPAMA es imposible hacer una interpretación debido a la variación lateral de los materiales, lo que si es posible hacer es una descripción general a profundidad de la zona basándose en la columna estratigráfica anterior.

Con los cortes litológicos de los informes y la columna podemos inferir que las tobas se encuentran a profundidad intercaladas con derrames de composición basáltica y andesítica; descansando estas intercalaciones en una capa de sedimentos lacustres.

Los sedimentos lacustres se encuentran sobreyaciendo a las calizas (Cretácico) y estas últimas descansando sobre el Complejo Acatlán.

En Metepec Abandonado, ubicada con las coordenadas 98°28'27" longitud oeste y 18°57'51" latitud norte, podemos observar la presencia de lavas almohadilladas (Pillow - Lavas) de color gris oscuro de composición andesítica, presentan zoneamiento inverso, por lo que estas rocas son más jóvenes que las tobas y claro está que en el lugar existía agua cuando llegó el derrame (Fotografía 6).



Fotografía 6. Lavas almohadilladas, en la localidad de Metepec Abandonado.

<sup>2</sup>SIC: Se usa entre paréntesis para indicar que lo que se afirma se cita textualmente.

En otro sitio con coordenadas  $98^{\circ}28'28''$  longitud oeste y  $18^{\circ}57'59''$  latitud norte cercano al manantial de Metepec Abandonado, se tiene una gran pared de Basaltos columnares (Fotografías 7 y 8).



Fotografía 7. Basaltos columnares en un sitio cercano al manantial de Metepec Abandonado.



Fotografía 8. Pared de basaltos columnares cercanos al manantial de Metepec Abandonado.

En la parte inferior de estos basaltos columnares se encuentra una gran espesor de derrames de rocas andesíticas, las cuales presentan un denso fracturamiento (diaclasas) y están en contacto con tobas, originando el manantial de Metepec Abandonado debido a la diferencia de conductividades hidráulicas. El manantial está ubicado con las coordenadas  $98^{\circ}28'27''$  longitud oeste y  $18^{\circ}59'16''$  latitud norte (Fotografías 9 y 10). Los manantiales se encuentran ubicados en el mapa geológico (figura 7).



Fotografía 9. Manantial de Metepec Abandonado, se puede observar el fracturamiento en la andesita.



Fotografía 10. Acercamiento al manantial de Metepec Abandonado.

Posiblemente la Barranca Metepec donde se encuentra situado el manantial corresponda a la traza de una falla normal de desplazamiento menor. Aunque es necesario verificar el comportamiento estructural por medio de un levantamiento de mayor detalle.

Otro de los manantiales que se encuentran dentro del área de estudio es el de San Baltazar Atlimeyaya y el de Axocopan.

En la fotografía 11, se observa el manantial de San Baltazar Atlimeyaya, ubicado con las coordenadas  $98^{\circ}28'57''$  latitud oeste y  $18^{\circ}59'16''$  longitud norte. Esta agua es aprovechada para la cría de truchas.



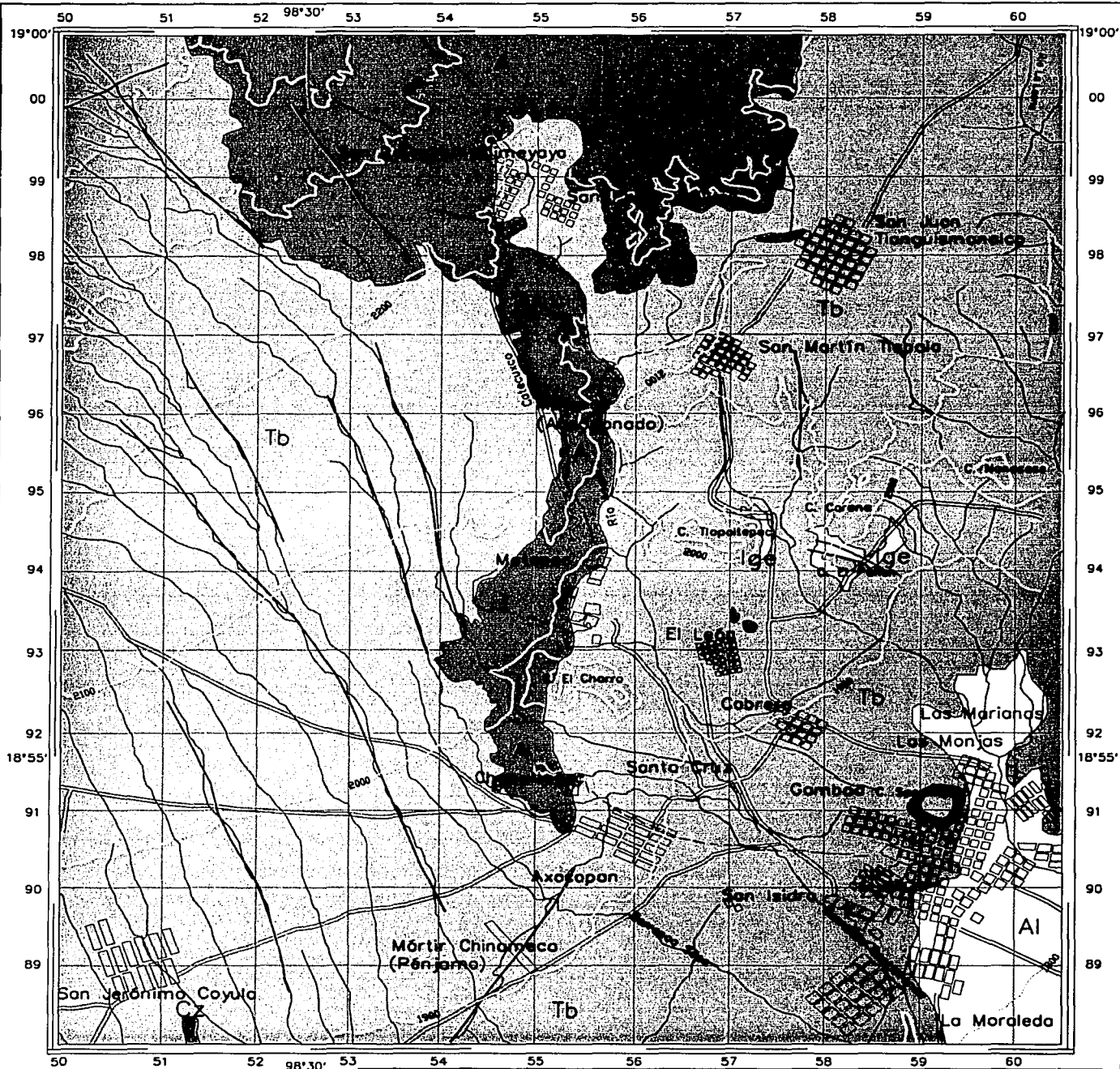
Fotografía 11. Manantial que se encuentra ubicado en la localidad de San Baltazar Atlimeyaya.

En la fotografía 12, se muestra el manantial que se encuentra ubicado en el poblado de Axocopan.



Fotografía 12. Manantial Axocopan, ubicado en el balneario de la localidad.

La ubicación de los manantiales, así como las relaciones geológicas se muestran en la figura 7 y en la imagen de satélite (proporcionada por el Ing. Sergio Yussim) figura 7<sup>a</sup>.



<p>Facultad de Ingeniería UNAM</p> <p>INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO</p> <p>CARTA GEOLOGICA</p> <p>Tesis Profesional</p> <p>Zaira V. Serrato Sandoval      Figura 7</p>		<p><b>Al</b> Aluvión</p> <p><b>And</b> Andesitas</p> <p><b>Tb</b> Tobas</p> <p><b>Call</b> Callizas</p>		<p>Poblados  </p> <p>Camino </p> <p>Curvas de nivel  (Equidistancia entre curvas 100m.)</p>		<p><b>SIMBOLOGÍA</b></p> <p>Fracturas </p> <p>Ríos </p>		<p>Contactos </p> <p>Manantial </p>	

96°37'37.1"

96°20'

19°01'36.5"

19°01'36.5"

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

18°50'32.4"

18°50'32.4"

96°20'

INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

IMAGEN DE SATELITE

Tesis Profesional

Zaira V. Serrato Sandoval

Figura 7a

ESCALA 1:250000

Facultad de Ingeniería  
UNAM

## CAPÍTULO IV

### CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL ACUÍFERO

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS

Los principales aspectos físicos e hidrodinámicos de los acuíferos para poder transmitir y almacenar el agua subterránea, se conocen como porosidad  $k$ , transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Mediante su conocimiento y uso, es posible determinar cuantitativamente la facilidad para transmitir el agua en cualquier punto, así como la cantidad de agua almacenada en el acuífero capaz de ser liberada. Su cálculo se lleva a cabo mediante pruebas de laboratorio o pruebas de campo, siendo estas últimas las que se utilizan para este tipo de trabajos. Estas pruebas de campo reciben el nombre de Pruebas de Bombeo.

Por medio de estas pruebas se conocen las características físicas de los acuíferos. En este caso se efectuaron pruebas de bombeo en un régimen variable, en pozos elegidos por su localización, por construcción y por disponibilidad para efectuar en ellos las pruebas.

Se realizaron 12 pruebas de bombeo, cuya localización de algunos pozos aparece en la figura 14; en la tabla 10 se presentan las lecturas de variación de los niveles piezométricos y los coeficientes de transmisividad obtenidos a partir de la interpretación de gráficas; se utilizó el método de Cooper-Jacob y Theis (*ver apéndice*). Otras características importantes se describen a continuación.

- **Porosidad**

Esta es una de las características petrofísicas más importantes de un acuífero. La porosidad en rocas volcánicas varía mucho según su origen.

De acuerdo con Davis y De Wiest 1966, las rocas andesíticas debido a su origen son rocas compactas por lo que su porosidad primaria es muy baja esto se debe a que la solidificación fue relativamente tranquila y por su composición intermedia (andesítica), siendo más viscosa que la básica (basaltos), por lo que la porosidad primaria es casi siempre menor al 5% en este tipo de rocas. La porosidad secundaria que presentan es muy alta, pues se observa un intenso fracturamiento (diaclasas), el cual fue producido inmediatamente después de la formación de la roca lo que incrementa su porosidad.

Con respecto a la porosidad que presentan las tobas, se realizó una prueba en el Laboratorio de Sedimentología de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, de la Facultad de Ingeniería; esta prueba se hizo con la finalidad de poder obtener una aproximación al valor real de la porosidad que presentan los sedimentos volcanoclasticos, las muestras que se tomaron para el análisis fueron las de tobas vitreocrystalinas de composición andesítica y dacítica.



El medio poroso está constituido por un volumen de poros  $V_p$  y un volumen de sólidos  $V_s$ . Para realizar el análisis de porosidad de la tobas vitrocrystalinas, parte de ambas muestras se sumergieron en agua por 24 horas, con la finalidad de que absorbieran la mayor cantidad posible, después de las 24 horas las muestras se sacaron del agua y fueron secadas para poder pesarlás, obteniendo el valor de SSS<sup>3</sup>. La densidad del agua a una temperatura de 4°C es de 1kg/dm<sup>3</sup>. Posteriormente se metieron al horno a una temperatura de 140° C, por espacio de 24 horas. Al sacarlas del horno se volvieron a pesar teniendo una diferencia de la muestra mojada y la seca, obteniendo así la cantidad de agua almacenada en los poros  $\Delta$ , la cual es considerada como el volumen de vacíos o de poros  $V_p$ , teniendo:

$$V_p = \Delta \times \text{densidad del agua} \dots\dots\dots(1)$$

El volumen de sólidos  $V_s$ , es la relación del peso seco de la roca entre la densidad de la muestra de roca. La densidad de la roca se determinó por medio del Picnómetro<sup>4</sup> y de la balanza de Jolly.

Para determinar la densidad por medio del picnómetro primero se tuvieron que pesar ambas muestras por separado en una balanza, posteriormente se bañaron de cera líquida, con la finalidad de sellar los poros para impedir la entrada de agua. Posteriormente se peso:

- a: picnómetro vacío
- b: picnómetro con agua
- c: picnómetro con el mineral
- d: picnómetro + mineral + agua

Con la fórmula 2 se obtuvo la densidad de ambas muestras con el Picnómetro:

$$\delta = \frac{c - a}{b + c - a - d} \dots\dots\dots(2)$$

Para determinar el volumen de sólidos para ambas muestras se obtuvo con la fórmula 3:

$$V_s = \frac{P}{\delta} \left\{ \begin{array}{l} \text{peso seco de la roca} \\ \text{densidad de la muestra} \end{array} \right. \dots\dots\dots(3)$$

Al haber obtenido todos los parámetros anteriores, por medio de la fórmula 4 se obtuvo el volumen del medio poroso:

$$n = \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots(4)$$

<sup>3</sup> SSS: Saturado Superficialmente Seco

<sup>4</sup> Picnómetro: Frasco que sirve para determinar las densidades de los cuerpos sólidos y líquidos.

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos de los cálculos anteriores:

TABLA 3. POROSIDAD DE TOBAS.

TOBA	SSS gr	T °C	P <sub>seco</sub> Gr	Δ gr	δ (H <sub>2</sub> O) gr/centímetro s <sup>3</sup> = V <sub>p</sub>	δ roca Pic.	δ roca B. Jolly	N % Pic.	n % Jolly
A	14.3	140	10.2	4.1	4.1	1.15 %	1.35 %	46	54
B	24.2	140	17.9	6.3	6.3	1.24 %	1.44 %	44	51

La toba A, vitreocrystalina de composición dacítica (estratificada), presenta una densidad más baja y porosidad más alta que la toba B, vitreocrystalina de composición andesítica. Las porosidades cercanas al 50 % para ambas tobas indica la presencia de arcillas, ya que estas se encuentran en el rango de porosidad entre 40 y 50 %, comprobándose con el análisis petrográfico que se tiene la presencia de minerales arcillosos.

Aunque la porosidad de un medio depende de varios factores, para medios no consolidados son de importancia el acomodamiento de los granos, su forma, gradación y tamaño. Con la variación de la litología presente en el lugar, que va de sedimentos vulcanoclasticos, presentando en algunos lugares desde buena hasta una mala porosidad, así como la presencia de los derrames fracturados, los lahares, etc. se puede concluir que el acuífero presenta una gran variación en los valores de porosidad. Esta variación en la litología provoca que se forme una estructura heterogénea teniendo como resultado zonas que va de baja a alta porosidad.

#### • Permeabilidad (k)

De acuerdo con Custodio 1983, la permeabilidad o conductividad hidráulica (k) es otro de las características importantes en los acuíferos. Con ella se puede determinar la facilidad con que un fluido se mueve a través de un medio poroso. Los factores que influyen en la permeabilidad, además de la naturaleza del terreno, pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y el valor depende de las propiedades del medio (tamaño de los poros k). Los extrínsecos son los que dependen del fluido y son su viscosidad<sup>5</sup> y peso específico. Tanto la viscosidad como el peso específico dependen de la temperatura, por lo que se debe tener en cuenta la influencia de la viscosidad en la permeabilidad, para poder tener una idea de su capacidad de drenaje.

Algunos estudios recientes muestran que la k (permeabilidad intrínseca, específica o geométrica), también llamado coeficiente de permeabilidad, puede estar influida por la temperatura hasta un 0.5 %/°C si se trata de materiales sueltos o poco cementados como los que se tienen en el acuífero, en general no es preciso tener en cuenta estas variaciones en la práctica, ya que las correcciones son de menor cuantía que los errores experimentales.

<sup>5</sup> Viscosidad: es la medida de la fuerza resistente, por unidad de área y por unidad de gradiente de velocidad transversal a la dirección del movimiento del fluido.

Los valores citados de viscosidad en la Tabla 4, están relacionados con la temperatura los cuáles fueron tomados de la tabla de Densidades y Viscosidades del Agua Pura por Perry 1958. La variación de la viscosidad puede llegar al 4 %/°C que es ya importante. Un cambio de temperatura de 5° C en el agua subterránea puede suponer un cambio en el mismo sentido del 20 % en la permeabilidad; dada la constancia de la temperatura del agua subterránea, no son de esperar variaciones en k superiores al 20%, aunque en casos de infiltraciones o recarga artificial puede llegarse a variaciones extremas del 75%. Por el contrario, el peso específico del fluido no se menciona, ya que el intervalo entre 10 y 30° C de esta propiedad, la variación es como máximo del 0.03 %/°C de modo que apenas influye el valor de k, según Schneebeli (1966).

En la Tabla 4, se registran los resultados de aquellos manantiales donde se tomaron datos de temperatura (°C), PH y de la Conductividad Eléctrica de diferentes años:

TABLA 4. EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MANANTIALES.

<b>LECTURAS DESDE 1997 A 2001.</b>				
<b>UBICACIÓN: MANANTIAL AXOCOPAN</b>				
FECHA DE LECTURA	TEMPERATURA °C	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA $\mu$ S (microsiems)	PH	VISCOSIDAD DINÁMICA (CENTIPIOSES)
3 - JUNIO - 1997	20.3	0.64	5.8	0.997
23 - FEBRERO - 2001	19.5	0.5	5.5	1.018
<b>UBICACIÓN: MANANTIAL METEPEC ABANDONADO</b>				
FECHA DE LECTURA	TEMPERATURA °C	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA $\mu$ S (microsiems)	PH	VISCOSIDAD DINÁMICA (CENTIPIOSES)
19 - JUNIO - 1997	20	0.324	6.71	1.005
28 - ABRIL - 2000	17	0.4	6.4	1.083
29 - SEPTIEMBRE - 2000	16	0.2	6.4	1.111
23 - FEBRERO - 2001	16.5	0.2		1.097
<b>UBICACIÓN: MANANTIAL SAN BALTAZAR ATLIMEYAYA</b>				
FECHA DE LECTURA	TEMPERATURA °C	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA $\mu$ S (microsiems)	PH	VISCOSIDAD DINÁMICA (CENTIPIOSES)
19 - JUNIO - 1997	14	0.18	6.57	1.171
28 - ABRIL - 2000	14	0.1	6.9	1.171
29 - SEPTIEMBRE - 2000	14	0.1	6.9	1.171
23 - FEBRERO - 2001	13.5	0.1		1.187

Los datos de conductividad eléctrica que se obtuvieron en San Baltazar Atlimeyaya son menores a los otros, incrementándose en Metepec y teniendo los valores más altos en Axocopan, ya que el valor de la conductividad eléctrica disminuye si el contenido de sales es mayor, por ser las sales un buen conductor de la electricidad.

Las causas que pueden alterar  $k$  es la composición química del agua, si existen arcillas capaces de flocularse o deflocularse. Lo mismo sucede si se producen disoluciones o precipitaciones, o bien se tienen arrastre y eliminación de las partículas más finas del medio o por el contrario se introducen materiales que se fijan dentro de los poros (colmatación).

De acuerdo a la clasificación granulométrica, podemos determinar la permeabilidad así como algunas otras de las características que están involucradas. Aunque es difícil hacer un estudio detallado basado en el análisis de curvas granulométricas o el intentar dar una respuesta digna de confianza, este tipo de información utilizada con criterio puede dar excelentes orientaciones prácticas.

En la Tabla 5, se indican las clases de terrenos de Bredding y Dürbaum 1963, se basan en el análisis de las curvas granulométricas de los sedimentos volcanoclasticos y muestran los rangos de los valores de permeabilidad que pueden presentar los sedimentos, así como una clasificación del funcionamiento del acuífero y de la permeabilidad de este, de acuerdo al tamaño de los sedimentos.

TABLA 5. PERMEABILIDAD DE ACUERDO CON BREDDING Y DÜRBAUM, 1963.

Ø milímetros	Clasificación	Permeabilidad según Hazen cm/seg.	Clase de Acuífero	Clase de permeabilidad
$< \frac{1}{256}$ a $\frac{1}{16}$	Arcillas y Limos	$\ll 10^{-5}$	Impermeable	Prácticamente impermeable
$\frac{1}{16}$ a 20	Arenas Gruesas	$9 \times 10^{-3}$	Pobre	Pequeña
$< \frac{1}{256}$ a 4000	Arcillas hasta Gravas	3	Hasta muy bueno	Muy alta

Basados con la información de la tabla de Clases de Bredding y Dürbaum y con la información obtenida (observación superficial), podemos interpretar que el sistema acuífero tiene una permeabilidad que varía de  $\ll 10^{-5}$  hasta 3 centímetros por segundo, teniendo las más bajas en las tobas vitreocristalinas, sus partículas son del tamaño de limos y arcillas.

Para el caso de los derrames clasificados como básicos (basaltos) e intermedios (andesitas), el factor que aumenta la permeabilidad son las diaclasas ya que permiten una apreciable circulación de agua. La permeabilidad máxima suele ser en la dirección del movimiento de la lava y la mínima, en dirección perpendicular a la colada. Por lo que la máxima permeabilidad será hacia el sureste del área de estudio, es decir, hacia la cabecera municipal.

Si se analiza en conjunto a las rocas basálticas y andesíticas, las cuales presentan un intenso fracturamiento; a los sedimentos vulcanoclásticos donde se tiene un espesor que varía de 30 a 100 metros y a la heterogeneidad del material; el acuífero acusa condiciones de buena permeabilidad, esto se tiene principalmente en las rocas basálticas y andesíticas fracturadas, sin embargo, también los materiales piroclásticos presentan localmente permeabilidades variables dependiendo del tamaño de las partículas.

Por falta de información no fue posible obtener los valores propios del terreno, por lo que solo se pudo obtener los valores del fluido.

- **Transmisividad (T)**

El concepto de transmisividad se define como el caudal que se infiltra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada (Theis, 1935).

Los valores promedio de transmisividades varían entre  $4.11 \times 10^{-2}$  a  $4.46 \times 10^{-5}$   $m^2/s$ , y representan en general la transmisividad del acuífero captado, lo que estaría indicando una disminución del tamaño de los materiales que forman el acuífero en esa zona, reflejando una baja permeabilidad.

Algunos de los resultados de transmisividades que se obtuvieron son muy bajos, esto se debe a que los pozos donde se efectuaron las pruebas están muy cercanos unos de otros, provocando una interferencia que origina mayores abatimientos, dando como resultados valores muy bajos.

- **Coefficiente de almacenamiento (S)**

El coeficiente de almacenamiento, se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica.

El valor de S no pudo ser calculado debido a que no se contó con pozos de observación.

## 4.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Una unidad hidrogeológica está formada por paquetes de rocas constituidos de uno o varios tipos de material, en los cuales las características físicas, tales como porosidad, permeabilidad, grado de cementación, etc., son similares y permiten un funcionamiento semejante para recibir y almacenar agua en el subsuelo.

Factores que se deben tomar en cuenta para el estudio de una unidad hidrogeológica:

- El área de la unidad
- La porosidad
- La litología
- La pendiente del terreno
- Tipo de drenaje
- Densidad de drenaje
- Número de aprovechamientos, se toma en cuenta manantiales, lloraderos, pozos de bombeo.
- Vegetación este factor influye en la infiltración del agua subterránea. Este factor representa una gran ventaja ya que disminuye la evaporación, lo cual ayuda a aumentar el agua disponible a infiltrarse.
- Tipo de suelo ya que influye en la conductividad hidráulica.
- El funcionamiento de la unidad.
- (S) Coeficiente de almacenamiento

Las empresas PEGSA y GEOCALLI, S.A. Consultores, en 1969 y 1982 respectivamente, realizaron estudios de geofísica en el valle de Atlixco – Izucar de Matamoros, con el propósito de conocer la litología a profundidad. En 1969 la compañía PEGSA realizó 27 sondeos eléctricos verticales de 1,200 metros; ubicados en la zona de Huaquechula al suroeste de Atlixco y en la zona de Tepeojuma en el área de Izucar de Matamoros, todos ellos fueron ubicados transversalmente al valle. Posteriormente la compañía GEOCALLI realizó sondeos eléctricos ubicados en la zona Ayutla – Tilapa (zona más cercana al área de estudio) en el área de Atlixco.

Por medio de la interpretación y correlación de los valores obtenidos y apoyados en los cortes litológicos de los pozos de explotación, ambas compañías determinan que la distribución de la corriente en el subsuelo no es homogénea, presentando variaciones, tanto en profundidad como lateralmente. La compañía GEOCALLI describe la zona de Ayutla – Tilapa de la siguiente manera:

Superficialmente se detectó una primera unidad, con valores resistivos que cubren un rango total de 5.0 a 79.0 ohms por metro, correlacionables a materiales granulares, tales como arenas, gravas, limos y arcillas provenientes de la desintegración de los afloramientos de roca circundantes. Los valores bajos registrados se deben a materiales arcillosos, el espesor que presenta este estrato es de hasta 9.00 metros.

Subyaciendo a esta capa se obtuvieron resistividades que fluctúan entre 5.0 y 170 ohms por metro, correspondientes a piroclastos clasificada como una segunda unidad, la marcada diferencia de este rango es consecuencia de la heterogeneidad existente en estos materiales, debido a lo cuál existen zonas permeables e impermeables. La conformación de esta unidad presenta una configuración variable, presentando un espesor medio de 180 metros; este cuerpo litológico por su posición vertical y valores resistivos obtenidos, parece corresponder a la zona acuífera, esta unidad forma parte del área de estudio.

Por debajo de estos materiales piroclásticos se registraron resistividades que fluctúan entre 14.9 y 37 ohms por metro, pertenecientes a depósitos lacustres formados por arcillas, areniscas, limolitas y yesos. Por sus características litológicas su permeabilidad es baja.

Con los valores de resistividad obtenidos de los sondeos eléctricos y su correlación con la información recabada de los reconocimientos hidrogeológicos de ambas compañías, así como la información obtenida en el campo para este trabajo, se permitió describir un modelo hidroestratigráfico general, es decir, para el Valle de Atlixco – Izucar de Matamoros. El cuál se construye de la siguiente manera:

Un fondo calcáreo (Cretácico) que corresponde a la unidad de rocas calcáreas, que se encuentra en los límites del valle y a profundidad del orden de 400 m. Este fondo tiene resistividades altas y medias, se considera que puede contener acuíferos la zona de 300 – 400 ohms por metro.

Las calizas forman una depresión sobre la que se han acumulado sedimentos lacustres y piroclastos. Los primeros están constituidos de arcillas, arenas y limolitas de naturaleza impermeable y los segundos están constituidos por diversos tipos de materiales volcánicos que incluyen: aglomerados, brechas, arenas, arcillas, cenizas y derrames; ellos forman una estructura heterogénea, por lo que pueden presentar, tanto zonas permeables como impermeables, aunque en general se consideran de interés acuífero.

Sobre esta acumulación volcánica se detectaron diversos derrames tanto de basaltos como de andesitas que se encuentran cercanas a la superficie, con un espesor que varía de 30 a 100 metros. Estas corrientes muestran zonas compactas y fracturadas, siendo estas últimas de interés acuífero.

Cubriendo a las diferentes unidades descritas, se encuentra una delgada cobertura de depósitos fluviales, eólicos y material intemperizado, que esta formado por una mezcla de arenas, gravas y arcillas, incluyendo fragmentos de roca sueltos (aluvión). Esta cobertura por su espesor menor de 20 metros no es de interés acuífero.

A continuación en la Tabla 5, se hace la descripción de las 2 unidades hidrogeológicas que afloran en el área de estudio, así como también se muestra en la figura 8, a la distribución en superficie de estas unidades. El aluvión no se toma en cuenta debido a que tiene poca extensión superficial y su espesor no excede de 0.60 metros.

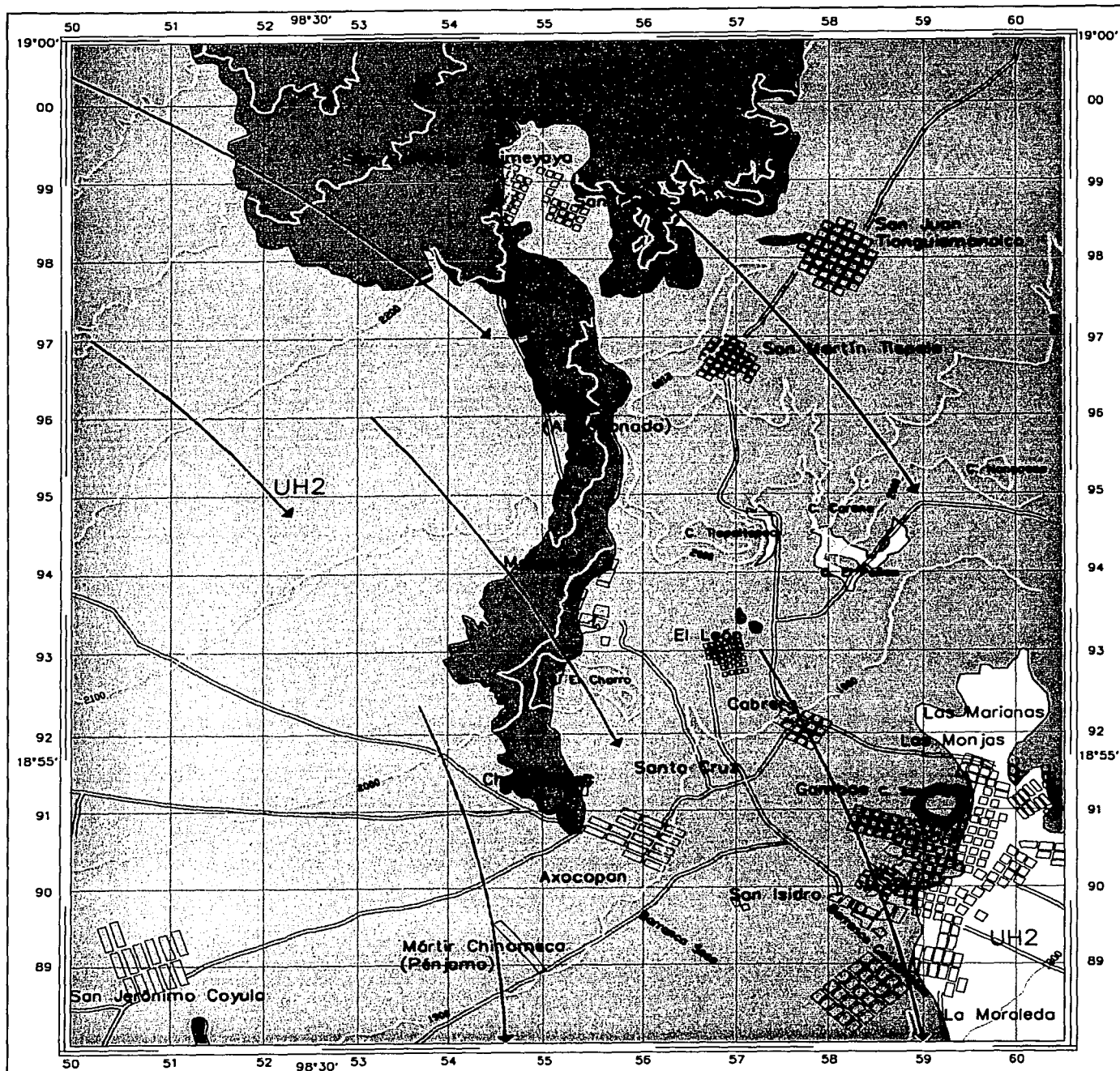
TABLA 5. UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

U	LITOLOGÍA	SUP Km <sup>2</sup>	PEND. DEL TERR.	TIPO DE DRENAJE	DENSIDAD DE DRENAJE M/Km	No. De APROV.	VEGETACIÓN	TIPO DE SUELO	FUNCIONA
ANDESITAS	Rocas andesíticas de composición intermedia (por su contenido de sílice). Su expresión morfológica es la de derrames o coladas. Clasificada como "Andesita de piroxeno".	14.915	80 %	Paralelo: se observa muy poco drenaje debido al intenso fracturamiento que presenta la unidad.	6300	Manantial: San Baltazar Atimeyaya.	Bosque de pinos subperennifoli a mezclado con matorral inerme. Freatofitas (Distichichilis spicata). Sirven como indicadores de la presencia de agua subterránea y de la calidad de la misma.	En esta unidad predominan suelos delgados formados por materiales no consolidados como cenizas volcánicas; se conocen con el nombre de Regosol mezclados con suelos poco profundos que se encuentran sobre roca dura (rocas volcánicas); son conocidos como Litosol.	Debido al grado de fracturamiento funciona como recarga para el acuífero.
TOBAS VITREOCRISTALINAS	Se diferencian 4 capas dentro de este paquete: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capas I y II. Formadas por fragmentos de Arcillas y limos (con <math>\phi &lt; 1/256</math> mm y entre <math>1/256</math> a <math>1/16</math> mm respectivamente). De acuerdo a la composición se han clasificado como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa I. Toba vitreocristalina de composición dacítica.</li> <li>• Capa II. Toba vitreocristalina de composición andesítica.</li> </ul> </li> <li>• Capa III. Formada por fragmentos del tamaño de las arenas gruesas (<math>1/16</math> a 2 mm de <math>\phi</math>), de color blanca, conocida como "toba pumicítica", "toba pumicita" o "pómez".</li> <li>• Capa IV. Formada por clastos de todos tamaños; desde arcillas hasta fragmentos de 3 o 4 metros de <math>\phi</math>. Llamadas "lahares".</li> </ul>	111.09	Al W es del 52% y al E es del 27.7% en promedio.	Paralelo y dendrítico	230,750	El manantial de Metepec Abandonado, algunas cascadas así como algunos lloraderos del mismo lugar y en Axocopan. También se tienen 12 pozos que abastecen de agua al municipio: 15 sur, Las palmas, Las monjas, Carolina 2, Tumbacarretas, Nieves, Infonavit 2, Carolina 1, Fovisste, Prados León, Valle sur y El León. Acueductos y canales.	Hacia el Norte de esta unidad predomina el Bosque de pinos mezclado con matorral inerme. Hacia el Sur es Bosque de caducifolia y cedro blanco.	Suelo depositado que ha sufrido pocas modificaciones (Fluvisol); suelos delgados formados por material no consolidado como cenizas volcánicas (Regosol), mezclado con un suelo poco profundidad sobre la roca volcánica (Litosol). Estos suelos se encuentran mezclados con uno de color claro, arcilloso (Cambisol); también se tienen aquellos oscuros muy lixiviados (Feozem).	Por la heterogeneidad de los materiales se presentan zonas permeables e impermeables, por lo que esta unidad funciona como acuífero.

Unidad Hidrogeológica UH1: ANDESITAS

Unidad Hidrogeológica UH2: TOBAS VITREOCRISTALINAS CON INTERCALACIONES DE LÍTICOS





Facultad de Ingeniería UNAM
INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
Tesis Profesional
Zaira V. Serrato Sandoval      Figura 8

UH1 Unidad Hidrogeológica: Andesitas

UH2 Unidad Hidrogeológica: Tobas intercaladas con Líticos

→ Línea de dirección de Flujo



De acuerdo con la compañía Geocalli 1982, en la región se tienen de las 6 unidades geohidrológicas que conforman el acuífero Atlixco – Izucar de Matamoros, sus características generales se describen en la Tabla 7.

TABLA 7. COLUMNA GENERAL DE LAS UNIDADES GEOHIDROLÓGICAS.

EDAD	FORMACIÓN	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS
CUATERNARIO	ALUVIÓN	<b>1</b>	Constituido por gravas, arenas, limos y arcillas. Sin interés hidrogeológico por su espesor reducido.
	DERRAMES VOLCÁNICOS	<b>2</b>	Andesitas, por el intenso grado de fracturamiento presentan una buena permeabilidad.
NEÓGENO	TOBAS	<b>3</b>	Constituidos por diferentes materiales volcánicos tales como lahares, tobas vitrocrystalinas y pumíticas con líticas intercalados que a profundidad se intercalan con derrames de composición basáltica y andesítica, los cuales forman una estructura heterogénea que presentan zonas permeables como impermeables. Esta unidad funciona como almacén.
	SEDIMENTOS LACUSTRES	<b>4</b>	Se tienen 2 facies, una arcillosa que es impermeable y otra yesífera con alternancia de limolitas y calizas arcillosas de baja permeabilidad. Por lo que esta unidad funciona como capa impermeable.
CRETÁCICO	ROCAS CALCÁREAS	<b>5</b>	Calizas, dolomitas, calizas arcillosas y limolitas calcáreas. Presentan un grado de fracturamiento importante. Se encuentra al sur del valle de Atlixco – Izucar de Matamoros. Algunas zonas forman acuíferos independientes.
PALEOZOICO	ROCAS METAMÓRFICAS	<b>6</b>	Metasedimentos y metavolcánicos, esquistos de cuarzo, grauvacas, filitas etc. Rocas naturaleza impermeable.

Tabla modificada de la Compañía Geocalli, 1982.

### 4.3 OBSERVACIONES CON EL PERMEÁMETRO

Una de las formas más directas para obtener la permeabilidad es aplicando la ley de Darcy a un cilindro del material en ensayo, realizándose por medio de un permeámetro.

El permeámetro es en esencia un vaso de Mariotte, el cual consiste de un frasco o vaso que permite una velocidad constante de salida del líquido que contiene. Consiste en un frasco bastante grande lleno de agua y cerrado por un tapón atravesado por un tubo de vidrio abierto por sus dos extremos. Una de las paredes del frasco lleva un tubo que permite vaciarlo. Si se abre el orificio, sale el agua y es reemplazada por el aire que entra por el tubo vertical. La velocidad de salida del agua es constante  $V=2gh$ , siendo  $h$  la diferencia de nivel entre el tubo de salida y el orificio inferior del tubo vertical, hasta que el nivel del agua en el vaso desciende por debajo de este. En efecto, la salida se debe a la diferencia de presión que existe entre el nivel del tubo de salida y la base del vaso, así como la atmósfera. Como la presión atmosférica se ejerce en el orificio inferior del tubo vertical, esta diferencia de presión es sencillamente igual a la presión ejercida por la columna  $h$  del líquido.

La conductividad hidráulica ( $k$ ) y el caudal ( $Q$ ), se calculan con las siguientes formulas:

$$K = \frac{CQ}{2\pi H^2} \left. \begin{array}{l} \text{Donde: } C=3.29 \\ H=15 \text{ centímetros de la base del permeámetro} \\ \text{(la parte introducida en el suelo)} \\ Q=\text{Caudal m}^3/\text{s} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

- Las dimensiones del permeámetro son las siguientes:

Tubo delgado del permeámetro

$$\varnothing=0.0119 \text{ m}$$

Largo del tubo=1.5 m

Calculando el volumen total:

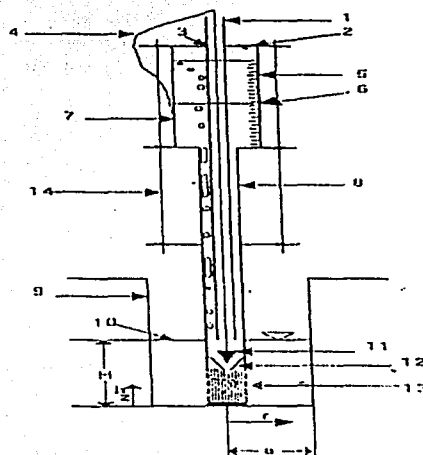
$$V_{\text{Tubo}}=\pi \left(\frac{0.0119}{2}\right)^2 (1.5 \text{ m})=4.252931055 \times 10^{-4}$$

Tubo grueso=1 l.  $\Rightarrow$  1 l=0.001 m<sup>3</sup>

$$V_T=4.252931055 \times 10^{-4} \text{ m}^3+0.001 \text{ m}^3=1.425293105 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

El permeámetro utilizado esta formado por las siguientes partes que se presentan en la figura:

1. TUBO ADMISOR DE AIRE
2. TAPÓN REMOVIBLE
3. SELLO MOVIL (para impedir la entrada la entrada de aire).
4. HILO DE PESCAR
5. ESCALA
6. LIGA
7. TANQUE
8. TUBO EXTERIOR
9. POZO
10. NIVEL ESTACIONARIO DE AGUA EN EL POZO
11. VÁLVULA MAQUINADA
12. PUERTO DE LA VÁLVULA
13. PUNTA DEL PERMEÁMETRO
14. TORNILLOS DE FIERRO PARA DAR SOPORTE A LOS TUBOS



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 17. PERMEÁMETRO DE GUELPH DE CARGA CONSTANTE

El procedimiento que se siguió para realizar las pruebas fue el siguiente:

- Se hace una perforación de 20 centímetros de profundidad en un medio no saturado
- Se limpia el pozo con un cepillo redondo
- Se llena el permeámetro con agua
- Se jala el hilo de pescar para permitir el paso del agua
- Empezará el conteo una vez que se deje pasar el agua con la finalidad de determinar el caudal infiltrado por unidad de área.

La conductividad hidráulica determinada es la del suelo, es decir, es tomada a nivel superficial del terreno, en medios no saturados. Al introducir el permeámetro en el pozo de 0.05 metros de diámetro y 0.20 metros de profundidad cuando el agua comienza a ser absorbida por el suelo, en el tubo del permeámetro se puede observar algunas burbujas. Estas se deben al aire desplazado que se encuentra entre los poros (zona no saturada) al estar absorbiendo el agua en todas direcciones.

Los resultados de la conductividad hidráulica fueron tomados con el permeámetro de Guellp de carga constante, el cual fue modificado por la Facultad de Ingeniería, UNAM. Se modificó con la finalidad de poder hacer las mediciones de la k directamente en el terreno.

Se hicieron pruebas en diferentes lugares con la finalidad de conocer la capacidad de infiltración en el suelo. Estas pruebas se realizaron en tobas con partículas del tamaño de limos y arcillas, donde se obtuvieron valores de  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  metros por segundo, lo que nos indica que la capacidad de infiltración de agua en esos terrenos es buena.

TABLA 8. MEDICIONES CON EL PERMEÁMETRO DE GUELP DE CARGA CONSTANTE.

FECHA: 29 DE SEPTIEMBRE DE 2000				
Lugar	Puntos	Tiempo Seg.	Q m <sup>3</sup> /s	K M/s
PUNTO MARCONI METEPEC ABANDONADO	1.	600 (10')	$10.44 \times 10^{-7}$	$2.49 \times 10^{-5}$
	2.	600 (10')	$9.76 \times 10^{-7}$	$2.27 \times 10^{-5}$
	3.	300 (5')	$25.56 \times 10^{-7}$	$5.94 \times 10^{-5}$

FECHA: 23 DE FEBRERO DE 2001			
Lugar	Tiempo Seg.	Q m <sup>3</sup> /s	K m/s
Axocopan	856" 14'16"	$5.841 \times 10^{-7}$	$1.359 \times 10^{-5}$
Pozo de bombeo León	1,065" 17'45"	$4.6948 \times 10^{-7}$	$1.092 \times 10^{-5}$
Presa (propuesta)	1,835" 30'35"	$2.725 \times 10^{-7}$	$6.34 \times 10^{-6}$
Noria piloto Las palmas	1,116" 18'36"	$4.48 \times 10^{-7}$	$1.043 \times 10^{-5}$

#### **4.4 MEDICIONES CON MOLINETE HIDRÁULICO**

Uno de los objetivos principales de este trabajo es revisar el volumen descargado por los manantiales realizando aforos en sus frentes de descarga en diferentes puntos de sus escurrimientos, con la finalidad de poder determinar el monto aproximado del volumen a reinfiltrar.

De acuerdo con Custodio, se les llama molinete hidráulico, a los instrumentos que se utilizan para medir mecánicamente la velocidad de la corriente de agua en la que están sumergidos, siendo estos los instrumentos más utilizados en la actualidad para la realización directa de aforos en canales o ríos.

El aforo con molinete se fundamenta en determinar mediante el mismo, la velocidad de las aguas en distintos puntos de un transversal del río, lo suficientemente próximo. Estas mediciones se realizan para conocer directamente el caudal de un río, canal o manantial en el momento en que se hace la observación.

En Marzo de 1998, se empezaron hacer aforos con molinete en diferentes localidades del municipio. Las mediciones se realizaron en los canales que se encuentran en el balneario de Axocopan, en los canales cercanos al Ahuehuate y al Restaurante Las Truchas, en San Baltazar Atlimeyaya, así como en los canales que se tienen en Metepec Abandonado y por último en Prados León.

En septiembre de 2000 y en febrero de 2001, se volvieron hacer mediciones en Metepec Abandonado (cercano a las lavas-almohadilladas), y en esta última fecha también se hicieron pruebas hacia el Sur, cercano al poblado de Bordos Los Tanques, ya que en este lugar se tienen varias cascadas las cuales descargan un caudal importante

TABLA 9. AFORO DE LAS DESCARGAS EN LOS FRENTEROS DE LOS MANANTIALES.

FECHA: MARZO, 1998.			
LUGAR	NOMBRE	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	OBSERVACIONES
Axocopan	Canal 1, (balneario)	0.056	El caudal total en Axocopan es la sumatoria del gasto de cada uno de los cinco aforos realizados. El resultado es equivalente a 854 litros por segundo.
	Canal 2, (balneario)	0.458	
	Canal 3, (balneario)	0.181	
	Canal 4, (balneario)	0.046	
	Casa del salto, (balneario)	0.113	
	Σ=	0.854	
Atlimeyaya	Canal, Colonia Solidaridad	0.348	El caudal en Atlimeyaya es la sumatoria de los ocho aforos realizados. Equivalente a 2063 litros por segundo.
	Canal 1, (Ahuehuete)	0.047	
	Canal 2, (Ahuehuete)	0.093	
	Canal 3, (Ahuehuete)	0.091	
	Canal 4, (Ahuehuete)	0.428	
Restaurante Las Truchas	Canal 1	0.482	
	Canal 2	0.270	
	Canal 3	0.304	
	Σ=	2.063	
Metepec Abandonado	Lavas almohadilladas	0.456	
	La lata	0.442	
	Las vacas	0.409	
	Σ=	0.435	
Prados León (Arcos)		0.420	
		0.561	
		0.617	
	Σ=	0.532	

FECHA: SEPTIEMBRE, 2000.			
LUGAR	NOMBRE	CAUDAL (m <sup>3</sup> /seg)	OBSERVACIONES
Metepec Abandonado	Lavas almohadilladas	0.369	El gasto fue menor que en 1998, se puede deber a la influencia de las nevadas y la intensidad de lluvias.

FECHA: FEBRERO, 2001.			
LUGAR	NOMBRE	CAUDAL (m <sup>3</sup> /seg)	OBSERVACIONES
Metepec Abandonado	Lavas almohadilladas	0.432	
Bordos Los Tanques	Río (presa propuesta)	2.192	En este lugar el gasto es muy grande pues se tienen 3 cascadas las cuales aportan gran contenido de agua.

En Marzo de 1998, la extracción de agua en los pozos que se encuentran dentro de la población de Atlixco, ocasionó una sobreexplotación de agua subterránea en el valle, que se manifiesta en un descenso medio anual de 0.80 metros en el nivel del agua en los pozos.

Por el poblado Bordos Los Tanques pasa el río Metepec donde se puede observar el gran caudal que lleva este río, parte de esta agua proviene de los manantiales de Metepec Abandonado y San Baltazar Atlimeyaya. En la fotografía 13, se puede observar la gran cantidad de agua que descarga una de las cascadas a este río, llevando parte de sus aguas a la Barranca Cantarranas o en las afueras de este valle.



Fotografía 13. Cascada del poblado Bordos Los Tanques, Puebla.

Ante la situación crítica del abatimiento de los niveles de los pozos, la administración del Municipio contempló, para la salvaguarda de los recursos hidráulicos del valle, la factibilidad de reinfiltrar al subsuelo, mediante recarga artificial, los excedentes de las descargas de los manantiales.



## 4.5 PRUEBAS DE BOMBEO

Uno de los métodos para recargar un acuífero consiste en la inducción de agua a través de pozos u obras similares. Cuando se conocen las características de sistema acuífero puede deducirse la capacidad de absorción de los pozos.

El conocimiento de las características físicas en un acuífero se obtienen mediante la ejecución de pruebas de bombeo.

Una prueba de bombeo consiste en observar los efectos provocados en la superficie de almacenamiento de un acuífero por la extracción de un caudal conocido y constante. Los efectos (abatimiento) son registrados en el pozo de bombeo y en pozos aledaños (pozos de observación).

Las selecciones de los pozos donde se efectuaron las pruebas cumplían con los siguientes requisitos:

- Se suspendió el bombeo 12 horas antes de que se iniciaran las pruebas.
- Los pozos cuentan con equipos de bombeo con energía eléctrica; por lo tanto tienen condiciones apropiadas para sostener el caudal constante durante el tiempo de ejecución de la prueba.
- Se contó con el equipo necesario para ser sondeados.

Como parte de las actividades de campo del estudio, en marzo de 1998, se realizaron 12 pruebas de bombeo, en pozos distribuidos en Atlixco.

En todos los casos las pruebas consistieron en una etapa de abatimiento cuya duración fue variable entre 1.5 y 12 horas.

Las pruebas fueron realizadas por alumnos del curso de Geohidrología, que se imparte en la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

## MÉTODO DE TRABAJO

Con el fin de lograr la realización de las pruebas de bombeo, fue necesario coordinar los trabajos con el organismo operador (SOAPAMA), de tal forma que se midieron niveles dinámicos poco antes de dejar de bombear cada una de las captaciones de prueba. El reposo duró casi 12 horas para garantizar el estado estático de todo el acuífero en donde se colocaron las sondas de medición, lo anterior se hizo con la finalidad de ahorrar tiempo en la ejecución.

Cada brigada de medición estuvo formada de 3 a 4 personas. Personal calificado supervisó la ejecución de pruebas de cada una de las 12 brigadas; el apoyo del organismo operador fue pieza clave en la organización, transporte y la comunicación vía radio.

El inicio de las pruebas fue marcado por el arranque simultáneo de tres pruebas, posteriormente cada 30 minutos arrancaron las siguientes.

## RESULTADOS

De acuerdo a la interpretación de las pruebas de bombeo puede decirse que la zona de estudio presenta un acuífero de semiconfinado a libre; esto se debe a la heterogeneidad de los materiales a profundidad.

La interpretación de las pruebas de bombeo se realizaron por el Método de Jacob y Theis, estos métodos son esencialmente para acuíferos confinados, los cuales son también válidos para acuíferos libres, con ligeras modificaciones, o a veces sin éstas. En este caso se utilizaron estos métodos ya que el acuífero funciona a nivel regional como confinado, esto se debe a dos causas, la primera, es la cercanía de los pozos y la interferencia de los radios de influencia entre ellos; los pozos son parcialmente penetrantes, situaciones que provocan abatimientos mayores de los normales. La segunda se debe a que la explotación del acuífero es continuo, día y noche. Estas causas provocan una alteración en el comportamiento de éstos, el agua que se bombea produce un descenso del nivel; en algunos de los pozos la inercia es muy baja, lo que hace que el volumen de agua para estos sea bajo, lo que muestra un funcionamiento de parcialmente confinado aunque este sea un acuífero semiconfinado a libre.

Para la interpretación de las pruebas de bombeo se realizaron por medio de un programa llamado Aquifer - Test versión 2.0. Este programa es para todo tipo de acuíferos. La tabla 10, presenta los datos obtenidos de las pruebas de bombeo.

TABLA 10. DATOS DE PRUEBAS DE BOMBEO.

POZO	HORAS BOMBEO	Q (LPS)	NIVELES (m)		TRANSMISIVIDAD $T \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
			ESTÁTICO	DINÁMICO	
15 SUR	12	34	17.82	32.00	$2.16 \times 10^{-2}$
LAS PALMAS	4	25	14.00	18.31	$4.11 \times 10^{-2}$
LAS MONJAS	5.5	30	20.12	26.95	$2.28 \times 10^{-2}$
CAROLINA 1	1.5	40	17.34	23.61	$4.91 \times 10^{-3}$
FOVISSTE	1.5	11.5	10.02	16.57	$1.84 \times 10^{-3}$
TUMBACARRETAS	12.3	4	14.40	30.89	$9.05 \times 10^{-5}$
CAROLINA 2	3	11.5	10.02	22.99	
NIEVES	2	1.7	65.10	78.54	$4.46 \times 10^{-5}$
VALLE SUR	1.7	?	23.40	27.95	
PRADOS LEÓN	2	14.2	18.00	25.16	$9.06 \times 10^{-3}$
INFONAVIT 2	11.5	34	30.42	63.21	$5.94 \times 10^{-4}$
EL LEÓN	2	?	45.55	45.55	

En algunas de las pruebas el nivel dinámico se estabilizó o mostraba una clara tendencia a ello, sugiriendo en estos casos el semiconfinamiento del acuífero.

En las figuras del apéndice se presentan en forma individual los análisis específicos de las curvas y los elementos de juicio que definen el funcionamiento general del acuífero de Atlixco.

Durante los ensayos de bombeo se presentaron algunos inconvenientes, como la presencia de válvulas cerradas, la existencia de cisternas de poca capacidad que impidieron observar en forma óptima el funcionamiento hidráulico de algunos pozos.

En el siguiente capítulo en la figura 23, se pueden observar las elevaciones de los niveles estáticos registrados por la compañía PEGSA (para la SARH), en 1979. Desde ese año hasta la fecha no se han vuelto a tomar profundidades al nivel del agua de manera sistemática (una vez por año), por lo que sería muy conveniente que se retomara esta recomendación.

#### **4.6 MODELO CONCEPTUAL**

A continuación se hará un breve resumen de las características hidrogeológicas.

Las principales unidades hidrogeológicas que afloran en el área de estudio son las volcánicas de composición intermedia (andesitas), productos piroclásticos (tobas) asociados en algunas partes con brechas volcánicas basálticas. El aluvión que representa a los materiales de acarreo y depósitos fluviales del reciente, tiene poca influencia dentro del área de estudio, como una cobertura de suelo de muy reducido espesor.

De acuerdo con la compañía GEOCALLI (1982), otras de las unidades hidrogeológicas que forman parte del acuífero pero no afloran dentro del área de estudio, pero se encuentran aflorando en el centro, y al sur del valle, son los sedimentos lacustres, los cuales están asociados con piroclastos; en esta área también se tienen aflorando a las rocas calcáreas del Cretácico (calizas y dolomías).

De las rocas mencionadas anteriormente, las de origen volcánico y lacustre forman en conjunto un sistema acuífero<sup>6</sup> cuya permeabilidad va de menor en los depósitos lacustres y piroclásticos finos (tobas vitreocristalinas de composición andesítica y dacítica), a mayor en las rocas volcánicas fracturadas (basaltos y andesitas) y pasando por intermedias en brechas y piroclastos gruesos medianamente compactados (brechas volcánicas basálticas y tobas pumíticas).

---

<sup>6</sup> Sistema Acuífero: Conjunto de unidades geohidrológicas comunicadas entre sí que delimitan un acuífero.

Las rocas calcáreas de origen marino, por la información que se tiene, funcionan como un sistema hidráulico independiente, ya que dos pozos que penetraron ésta formación, sus niveles piezométricos se encuentran a diferente altura del resto de las obras perforadas en otras unidades.

En condiciones originales, la recarga que recibe la zona de estudio, se encuentra supeditada al volumen precipitado dentro del área, así como las nevadas, que causan la infiltración de los deshielos de la vertiente oriental del Popocatepetl; las descargas de la misma zona, se componen de una descarga artificial, representada por la extracción por bombeo de pozos y norias; otra natural, compuesta por la descarga de los manantiales, que se lleva a cabo por contacto litológico, entre las tobas y las andesitas; representa parte importante del volumen escurrido del río.

## CAPÍTULO V

### RECARGA ARTIFICIAL

De acuerdo con MOPU<sup>7</sup> (1986), la recarga artificial de acuíferos es el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua.

Otra definición: Proceso que consiste en introducir en una formación permeable el agua que se pueda reunir para utilizarla después en condiciones de régimen de caudal o de calidad diferentes.

Otra más adecuada para este caso: Medida de ingeniería (sic) que consiste en asegurar las condiciones favorables para disponer parte de los escurrimientos superficiales en escurrimientos subterráneos, siendo una tarea de muchos aspectos que asegura no solo la reposición de las reservas de agua subterránea y su protección contra el agotamiento, sino también la utilización mas integral y racional y la protección de los recursos hidráulicos, los suelos y los recursos naturales.

Todas estas definiciones adolecen en alguna forma de algún aspecto. En el caso del Valle de Atlixco por ejemplo, los escurrimientos superficiales provienen de las descargas de agua subterránea y se trata por tanto, de una infiltración. De cualquier forma debe destacarse que las definiciones anteriores marcan cuatro puntos comunes principales:

1. La intención de restituir al acuífero (s) parte del agua extraída.
2. El deseo de disponer de más y mejor agua subterránea.
3. El hecho de que la recarga artificial representa una alteración del balance hídrico por el hombre y
4. que es una tarea que contempla muchos aspectos técnicos.

También es importante anotar que es muy frecuente aludir únicamente a aspectos de cantidad, y de hecho, en muchas situaciones estos son los dominantes, pero los aspectos de calidad son muy importantes, y cada día lo son más.

Con todo lo anterior se pueden readaptar las anteriores definiciones para decir que la recarga artificial es la ciencia y el conjunto de técnicas que permitan aumentar la disponibilidad de agua subterránea, con la calidad apropiada a los usos a la que se destina mediante una intervención consciente, directa o indirecta, en el ciclo natural del agua.

---

<sup>7</sup> MOPU: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. México.

El objetivo de esta técnica es:

- Reinfiltrar los excedentes de las descargas de los manantiales, evitando la pérdida y contaminación del agua.
- Reducir o eliminar el descenso de nivel del agua subterránea y, en su caso, elevar los niveles para reducir el coste de extracción y/o mantener los caudales de explotación.
- Compensar la pérdida de recarga natural al acuífero, que se produce en mayor porcentaje por factores naturales, que son los acuíferos.
- Suplementar la cantidad de agua subterránea disponible y permitir mayor extracción anual y, en su caso, estacional, conservando los pozos y otras obras de captación existentes y evitando la instalación de costosas obras de aguas de otras procedencias en un futuro.

En el área de estudio se efectuaron las investigaciones necesarias (citadas en los capítulos anteriores), con la finalidad de conocer la capacidad transmisora del acuífero.

Como se describió en el capítulo III, la litología esta conformada principalmente por materiales volcánicos los cuales presentan grandes variaciones en sus propiedades debido a la heterogeneidad.

Los métodos de recarga artificial son generalmente de dos tipos: métodos de superficie y métodos de profundidad.

El método de superficie utiliza lagunas en las que el agua se infiltra desde la superficie del terreno al percolar a través de la zona de aereación hasta que alcanza el nivel de saturación del acuífero. En este caso se trata naturalmente de acuíferos libres. Este método tiene tres serias desventajas: requiere suelos con muy buen drenaje, tales como los arenosos y los de alto contenido de gravas, extensas superficies y grandes obras para construir las lagunas y que el nivel freático se encuentre entre 3 y 5 metros de profundidad.

Los métodos de profundidad utilizan dos tipos de pozos: de inyección y de absorción. Se acostumbra llamar "pozo de inyección", aquel en que el agua se transmite a través de él directamente al acuífero; pozo de absorción es aquel en que su fondo queda por encima del nivel de saturación y en los que el agua se infiltra a través de las paredes y el fondo.

En el caso del Valle de Atlixco, los suelos están formados por arenas y limos endurecidos o de lahares de baja conductividad hidráulica y en una planicie inclinada de 33° aproximadamente, inapropiada por este aspecto natural del terreno para la construcción de lagunas de infiltración.

La opción de infiltrar el agua en pozos de inyección enfrenta a su vez en el valle dos limitantes: la conductividad hidráulica en el entorno de la batería de norias y la poca profundidad al nivel del agua desde el terreno. Este último aspecto se traduce en una baja presión estática en el fondo de las columnas de agua en los pozos. Los dos aspectos combinados: bajas capacidades transmisoras y presiones en las paredes y fondos de los pozos, ocasionaría que el agua para infiltrar, llenara los pozos y se derramara hacia la superficie. En la Tabla 10 del capítulo IV, se muestran los datos de transmisividades.

Las consideraciones anteriores sugieren probar con métodos de infiltración más conveniente que el de las obras o pozos de absorción, que en terrenos geológicamente similares a los del Valle de Atlixco, como son los de Ciudad Universitaria en el Distrito Federal, han funcionado bien. Aquí, pozos de 0.3048 metros, y 50 metros de profundidad, han infiltrado caudales máximos del orden de 50 litros por segundo.

En el Valle de Atlixco, por el monto de los caudales a infiltrar, no se recomiendan pozos, sino otro tipo de obras. Una de estas obras, sería similar a la noria que se perforó al lado del Pozo Nieves, pero con la adición de drenes radiales para darle mayor capacidad de infiltración. La ventaja de una obra de este tipo (figura 19), 3 metros de diámetro y 20 metros de profundidad, es que admite mayor volumen de agua que un pozo de 0.4572 metros de diámetro y 50 metros de profundidad.

Otra de las obras aceptables sería la construcción de una presa, esta se utilizaría para el almacenamiento del agua, con la finalidad de reinfiltrarla por medio del fracturamiento de la roca. Aunque también existen otras posibilidades para la explotación de esta obra dándole una utilidad a esta agua, las cuales podrían ser que se almacenara para riego, también podría funcionar para la construcción de un centro vacacional, así como también para el abastecimiento de agua potable evitando la sobreexplotación de agua subterránea en el valle esta determinación dependería de las circunstancias del lugar, así como de la disponibilidad de recursos por parte del SOAPAMA. La ventaja de este tipo de obras es que admite un gran volumen de agua, que los riesgos de contaminación para el acuífero son menores debido a que se tiene una muy buena depuración del agua por medio de sus filtros y que es menos costosa que el tratamiento que se necesita para los pozos de absorción entre otras ventajas. Actualmente se tienen obras como canales, acueductos, etc., sin embargo no son suficientes, pues más de la mayor parte del agua se pierde.

Claro está que para ambos métodos siempre se tienen tanto ventajas como inconvenientes, los cuales se deben de tomar en cuenta antes de hacer la elección de alguno de estos:

- Los pozos de absorción requieren menos superficie que la presa.
- La recarga en profundidad evita problemas de pérdida de agua por evaporación.
- La presa si no esta operada de forma adecuada puede presentar problemas estéticos y ambientales, tales como proliferación de insectos y roedores. A parte se requerirá de cercados y vallas para proteger a personas y animales de caídas.

- El precio y disponibilidad del terreno juegan un papel importante en la selección del método. Terrenos económicos favorecen la recarga en superficie, si es viable, y terrenos costosos favorecen la utilización de los pozos de absorción e incluso de construcción costosa.
- Los pozos de absorción suelen requerir agua muy limpia y/o sistemas muy efectivos de limpieza, con costos de mantenimiento a veces importante. Este costo y necesidad de intervención es mínimo en la presa.
- El grado de depuración conseguido en el agua recargada suele ser mayor en los métodos de superficie (presa), que en los métodos de profundidad (pozos de absorción), y los riesgos de contaminación del acuífero son menores. El paso por el medio no saturado y la formación de un filtro natural son decisivos para conseguir una buena eliminación de contaminantes.
- La presa puede requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arcillosas, retirar vegetación, y además también se requerirán estructuras para el manejo y movimiento del agua.
- La presa requiere de una mayor inversión monetaria que las norias, aunque para el futuro posiblemente sea más costoso el mantenimiento de las norias que de la presa.

La presa y los pozos de absorción serían los métodos más aceptables para el aprovechamiento de esta agua. Al considerar cualquiera de las dos obras, conviene considerar los posibles efectos sobre la población, las obras humanas y el territorio.

A continuación se describirán ambas obras:

## **5.1 REINFILTRACIÓN POR NORIAS RADIALES DE ABSORCIÓN**

Con las características hidrodinámicas con que cuenta el acuífero, mencionadas en el capítulo anterior se propuso construir un pozo de absorción radial con la finalidad de conocer la capacidad de toma.

La primera prueba se llevó a cabo cerca del canal Prados León 3, esta se realizó llenando de agua el pozo de prueba con 3.2 metros de diámetro y 10.71 metros de profundidad con el fondo ubicado a 14 metros encima del nivel estático. El agua fue transportada en camiones (agua limpia), ya que se desconoce la calidad del agua conducida por los canales. En este punto se considera muy conveniente recalcar en la catástrofe que se puede ocasionar a un acuífero al infiltrársele agua de mala calidad. Se infiltró un volumen de 115 m<sup>3</sup> en 10 horas, por lo que se concluye que el pozo tomó a razón de 3.2 litros por segundo durante la prueba. El llenado de la noria fue a razón de 10 litros por segundo con una carga del 75 %. En las primeras 2 horas del llenado, se presentó flujo de agua en un pozo de observación localizado a 2.7 metros del de la prueba, reconociendo principalmente zonas de fracturamiento.

De lo anterior se deduce que de contar con carga constante y drenes radiales, los volúmenes de infiltración aumentarían considerablemente de tal manera que pudiera infiltrarse por lo menos un caudal de 100 litros por segundo con la construcción de por lo menos 12 obras similares.



De acuerdo con el informe presentado por la Facultad de Ingeniería, UNAM (1998), para las obras propuestas se sugiere construir (figura 10), norias de 3 metros de diámetro y 20 metros de profundidad.

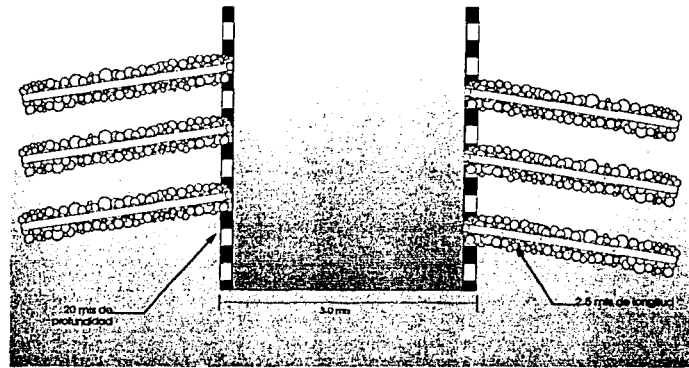
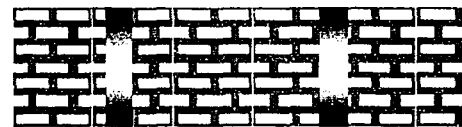


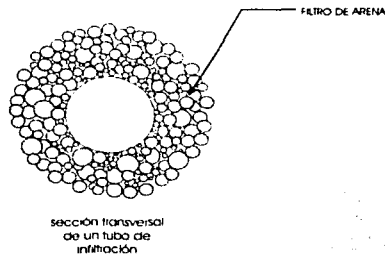
Figura 10. Diseño de Noria con drenes radiales.

Estas deberán ser ademadas, porque en seco las paredes se mantienen sin necesidad de ademe, pero después de un cierto tiempo cuando el material este ya saturado, es posible que se tengan derrumbes, sobre todo en las capas de arenas pumicitas. El ademe puede construirse con ladrillo tipo refractario entresbolillo con puntales horizontales que le den sustento a la rejilla del ladrillo (figura 11).



Castillo

REJILLA DE LADRILLO CON  
PUNTALES HORIZONTALES  
QUE LE DEN SUSTENTO



sección transversal  
de un tubo de  
infiltración

Figura 11. Propuesta para la construcción de la Noria.

Dadas las condiciones satisfactorias de infiltración de dicha prueba se recomienda la construcción de por lo menos 12 obras similares mencionadas anteriormente, las cuales quedarían localizadas de la siguiente manera.

Seis de las obras similares separadas una distancia de 100 metros, entre los canales Prados León 2 y Prados León 3, con el fin de tomar un frente de infiltración.

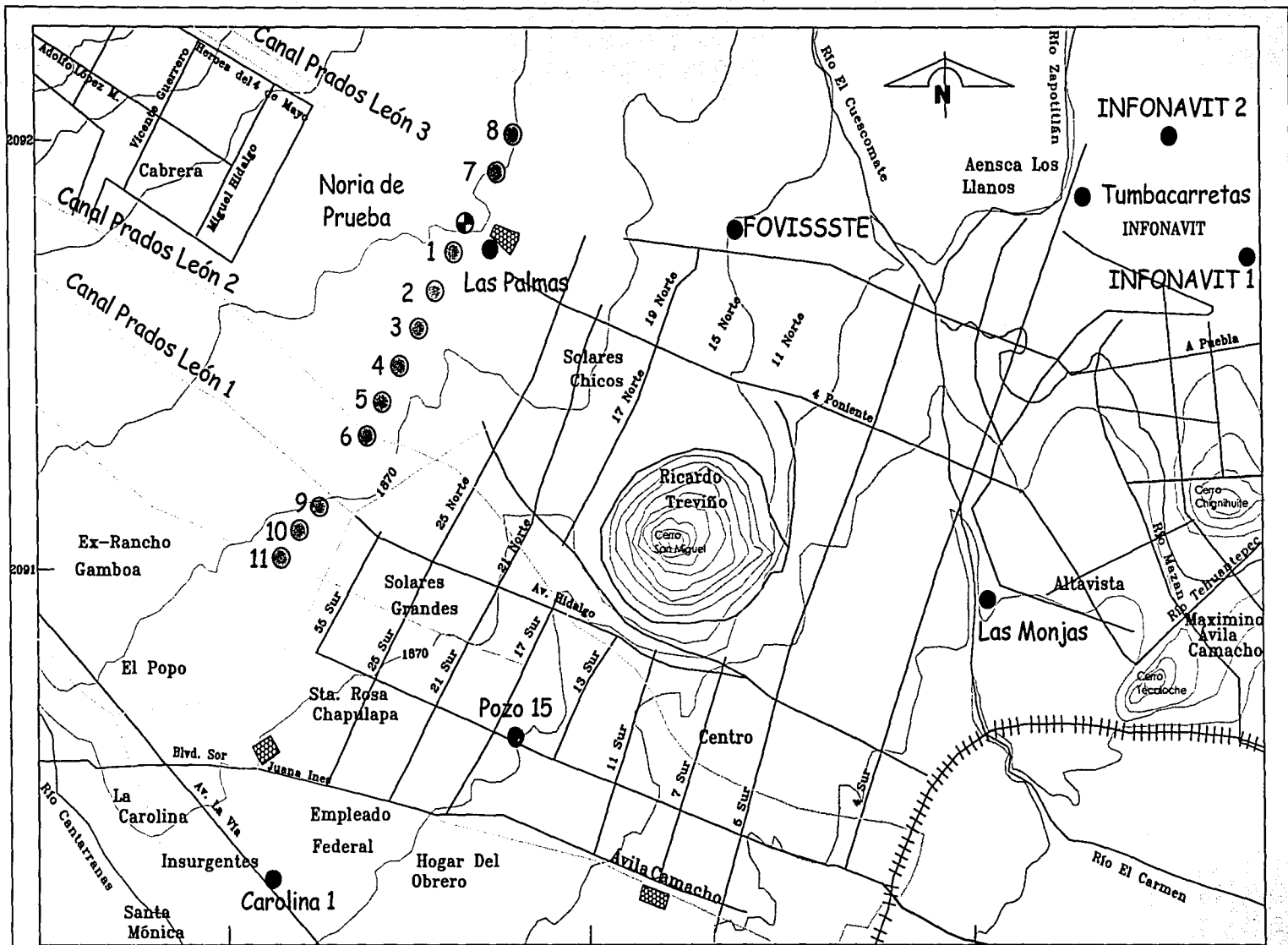
También se recomienda la construcción de otras dos norias con drenes radiales al noroeste del canal Prados León 3, separadas igualmente 100 metros entre sí. En el mismo sentido, se recomienda la construcción de otras tres norias radiales entre el acueducto y el canal Prados León 2.

Los efectos de la eventual infiltración en este frente se manifestarían en el ascenso del nivel del agua en los pozos FOVISSTE, Las Palmas, 15 Sur y Carolina. Sin embargo es conveniente aclarar que las pruebas de tiempo de vaciado en las norias que se construyan ex profeso, arrojarían datos mas aproximados sobre el tiempo de tránsito del agua en el subsuelo.

En cuanto a la calidad del agua que se infiltraría, se tiene previsto por SOAPAMA, realizar análisis físico-químicos de los manantiales, ya que estos son contaminados desde los primeros metros de su nacimiento. También se realizaría un análisis de la infraestructura de conducción, ya que es posible utilizar la existente dando un saneamiento adecuado. El éxito obtenido en la prueba de infiltración, permite la continuación de las investigaciones con perspectivas igualmente exitosas y con la consecuente preservación del agua subterránea.

La ubicación de las norias de absorción propuestas quedarían localizadas en el frente de recarga natural del acuífero sobre explotado (figura 9). Esto ayudaría a reducir la tendencia de los abatimientos a un bajo costo.

En la figura 10 se puede observar la dirección del flujo y la elevación de los niveles estáticos en el área que se propone la batería de norias. Este registro fue realizado por la compañía PEGSA para la SARH, en el año 1979.



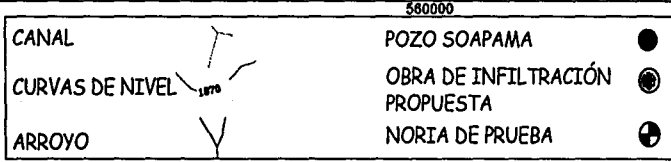
Facultad de Ingeniería  
UNAM

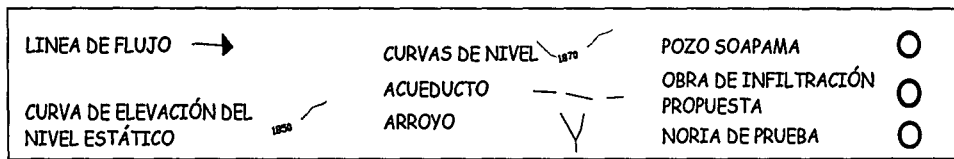
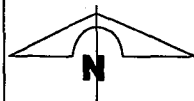
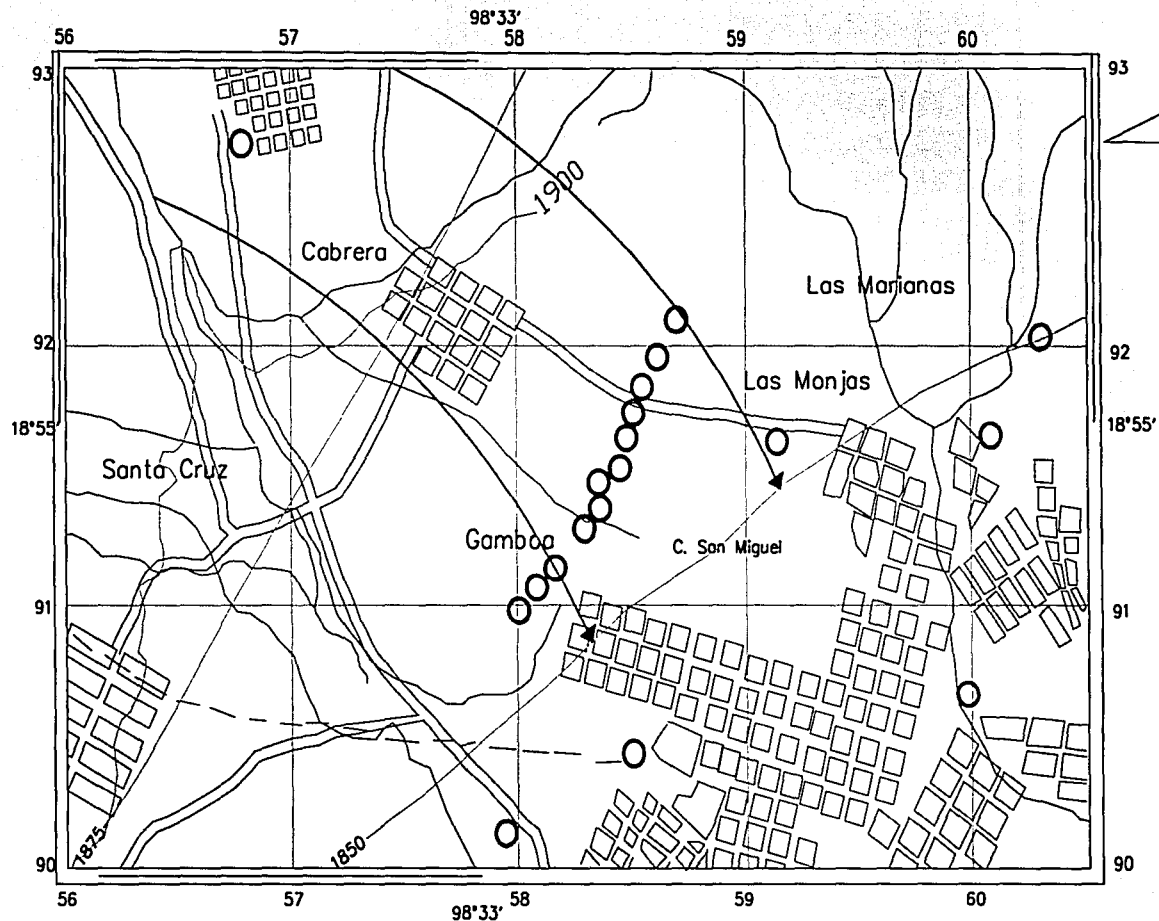
INVESTIGACIONES PARA REINTEGRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATlixco

LOCALIZACIÓN DE OBRAS DE INFILTRACIÓN

Tesis Profesional

Zaira V. Serrato Sandoval      Figura 12      TOMADO DE F.I. 1998





Facultad de Ingeniería  
UNAM

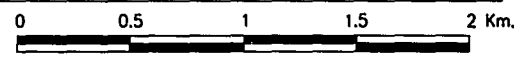
INVESTIGACIONES PARA REINTEGRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

CURVAS DE ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1979

Tesis Profesional

Zaira V. Serrato Sandoval    Figura 13

ESC. 1: 25,000  
MODIFICADO DE SARH 1979



## 5.2 REINFILTRACIÓN POR MEDIO DE AGUA REPRESADA

Se plantea la posibilidad de construir una presa, cuyo sitio más favorable se encuentra localizado en la parte noroeste de la Cabecera Municipal de Atlixco, con coordenadas geográficas en su parte central de la cortina 98°27'55" longitud este y 21°50'32" latitud norte (Figura 14).

El acceso al sitio es partiendo de la Cabecera Municipal de Atlixco por una brecha de 1.5 Kilómetros del poblado Las Monjas continua una terrecería que pasa por la localidad Cabrera, aproximadamente 1.8 Kilómetros adelante, la terrecería va a la localidad de San Martín Tlapala; la entrada es en el Cerro Tlapaltepec; el camino no esta pavimentado, es una brecha de 1.2 Kilómetros hacia el sitio del proyecto.

Para la propuesta de esta obra se hizo un reconocimiento preliminar del posible lugar de emplazamiento para la presa.

Se propone que se construya una presa con una altura de 7 metros aproximadamente; el caudal es de aproximadamente de 2.192 m<sup>3</sup>/s ó 2192 litros por segundo, donde se hizo la medición con el molinete el río tiene 7.20 metros de ancho. Para la construcción de la obra se buscaría el lugar más angosto y estable, esto es, para excavar lo mínimo de material, con la finalidad de ahorrar costos, dado que los movimientos de tierra son muy caros. Esta será desplantada directamente sobre la roca andesítica o basáltica; para las excavaciones subterráneas principales, será necesario hacer una determinación lo más exacto posible de la profundidad de la roca a lo largo del eje de la presa. Para determinar la altura de la cortina se haría un aforo al frente de todas las descargas en épocas de lluvia, ya que no se cuenta con registros de avenidas máximas debido a que las estaciones hidrométricas con que se contaba fueron cerradas años atrás; únicamente se cuenta con una estación climatológica. Los datos de las estaciones son de gran importancia ya que son necesarios para el diseño del vaso. Para minimizar costos, la cortina se haría con los materiales que se tiene en el lugar.

Se propone que el sitio de la obra quede ubicado al noroeste de la Cabecera Municipal; el límite de embalse estaría ubicado a 150 metros aguas abajo de la cascada grande, es decir, al frente de las descargas de los manantiales Metepec Abandonado y San Baltazar Atlimeyaya; la presa deberá tener una capacidad efectiva de almacenamiento. Para la altura real de la cortina deberá de hacerse un estudio topográfico a detalle, con la finalidad de obtener un área considerable del espejo de agua tomando en cuenta la proximidad del manantial, para no afectar su aprovechamiento al sucederse una ascenso en el agua, ahogando el cuerpo.

Se deben considerar todas aquellas evaluaciones y cálculos para la infraestructura civil, eléctrica, mecánica, estudios químicos y bacteriológicos para conocer la calidad del agua; los estudios sociales y ambientales son de gran importancia. Una vez aceptado el proyecto y evaluada las condiciones geológicas del lugar donde se asentará la obra, se construiría la cortina. Existen poblados cercanos que se beneficiarían con el proyecto, se generarían fuentes de empleo desde la mano de obra, materiales, servicios, etc.

Es importante tener presente que antes de empezar con todos los análisis y estudios necesarios para la construcción del proyecto, es necesario reunir un conocimiento completo de las condiciones naturales existentes del lugar, incluidos las características de los materiales y las fluctuaciones que puedan esperarse en el caudal de la corriente.

Para esta propuesta únicamente se hizo un reconocimiento preliminar en los que se reunieron datos sobre la litología, tanto de materiales consolidados como no consolidados y de la estructura. La fisiografía y el agua subterránea (pozos, manantiales, corrientes), se han estudiado en capítulos anteriores.

De la litología, se identificaron los tipos de roca expuestos en el área: esta caracterizada por rocas volcánicas extrusivas y se encuentran aflorando tobas un gran espesor de andesitas, las cuales presentan un denso fracturamiento vertical.

Para la realización de esta obra será necesario conocer la permeabilidad  $k$  del vaso y sitio de la presa, así como también la resistencia de la roca firme (andesita), esto es con la finalidad de poder definir las condiciones que presenta la roca para la cimentación y delimitación. Se sabe que este tipo de roca presenta una resistencia muy alta, aunque será necesario conocer la profundidad y espesor de estas ya que estarán funcionando como soporte.

Con respecto a las observaciones estructurales que se tienen del lugar, la roca ígnea extrusiva presenta un denso fracturamiento vertical y si se optará por la recarga del acuífero sería necesario se construyera donde se tenga un gran fracturamiento en el vaso.

En el sitio se puede observar el intenso fracturamiento que presentan los basaltos el cuál es casi vertical (Fotografía 14).



Fotografía 14. Fracturamiento en las andesitas, margen izquierda del río Catecuzco, en el poblado de Metepec Abandonado.

Si se llevará a cabo la realización de esta obra, se empezaría por hacer un levantamiento geológico detallado. Se analizarían las condiciones geológicas que puedan afectar a la estabilidad y al éxito de la presa, o aquellas precauciones especiales que se deban tomar durante la excavación o la construcción. Por lo que se tendría que llevar a cabo un estudio litológico y estructural del área, se tomarían muestras para analizar en el laboratorio la resistencia y preparar láminas delgadas para el estudio en el microscopio. Al mismo tiempo se haría un levantamiento estructural, donde se determinarían las características de las fracturas y las posibles fallas, así como el comportamiento en relación con la obra. Por la heterogeneidad de los materiales presentes en el valle se tiene una variación en la permeabilidad, por lo que es aconsejable emplear un amplio factor de seguridad, así como también es necesario saber la profundidad de la roca firme. Todo lo anterior se debe conocer con detalle, para que se pueda establecerse sobre esos materiales una presa.

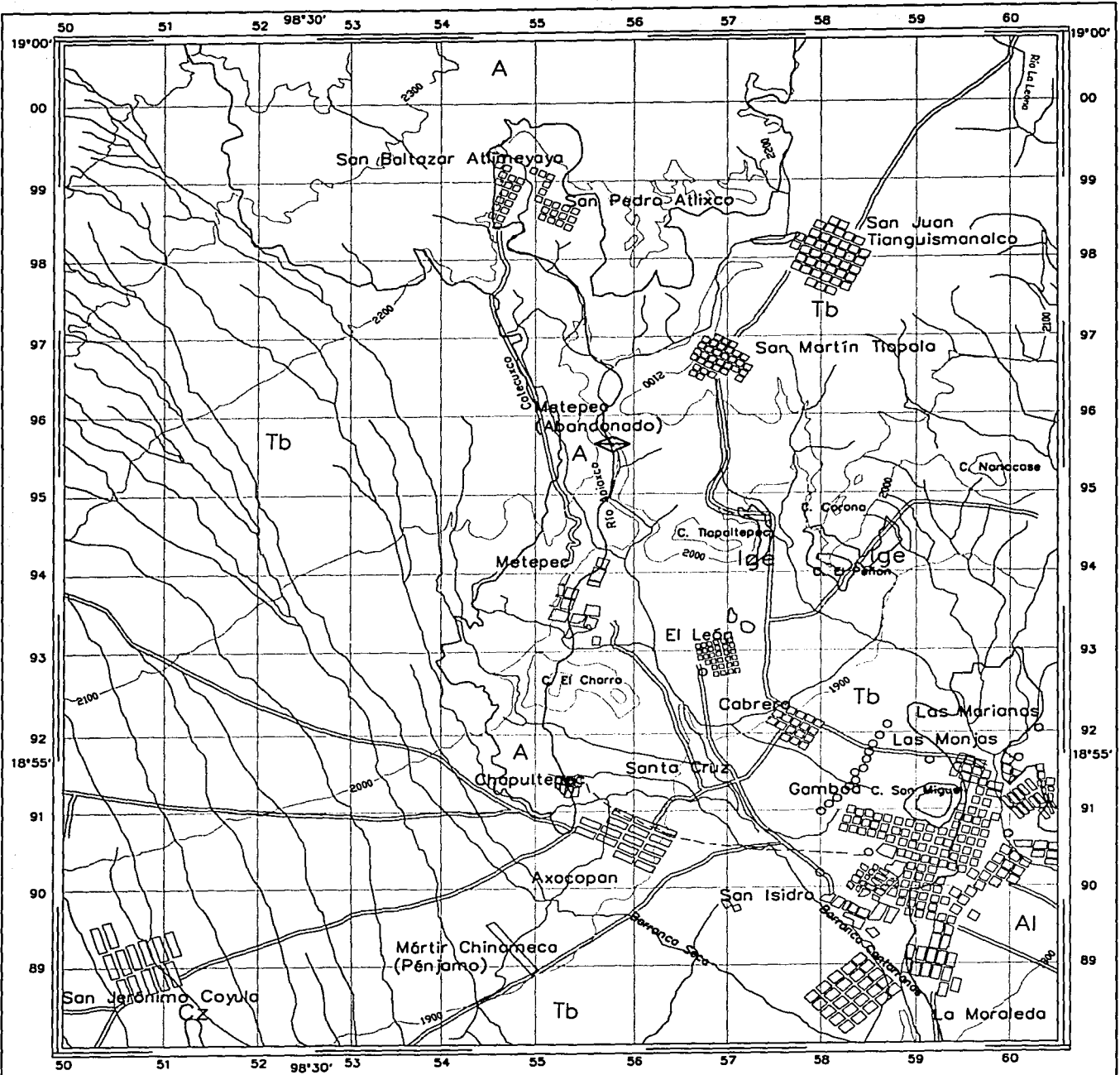
Otro de los aspectos que se debe tener presente son todas aquellas posibles afectaciones a futuro del medio ambiente, por lo que se llevaría a cabo un estudio ambiental, en donde se tienen que tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Reforestación de las áreas afectadas.
- Estudio de la calidad del agua del río.
- Estudios de predicción de impactos derivados del embalsamiento y de la modificación del régimen de escurrimiento del río y diseño de medidas preventivas.
- Diagnóstico de las condiciones ambientales actuales de la cuenca .
- Exploración y rescate de vestigios arqueológicos.
- Acciones de prevención y control de la contaminación ambiental originada por el proyecto.

Cualesquiera de los proyectos elegidos, deberá convertirse en una oportunidad de progreso, desarrollo social, preservación y mejoramiento de las condiciones ambientales en la zona de las obras y su vecindad. Existen 2 opciones las cuales pueden ser benéficas en un futuro para el municipio con la construcción de esta obra, ya sea que se eligiera con la finalidad de la recarga o del abastecimiento de agua potable, pues esta última opción disminuiría el incremento de la sobreexplotación del valle y la primera como su nombre lo dice lo ayudaría a infiltrar todos los excedentes.

El tiempo en que este efecto se vería reflejado en los pozos se desconoce con certeza. De los resultados de las pruebas de bombeo y de los pocos datos sobre profundidad y terminado de los pozos, se infiere que la velocidad promedio de escurrimiento subterráneo es de centímetros por día.

No se considera inútil subrayar que el costo de un ensayo ya sea para las norias o para la presa es mínimo comparado con el beneficio que se podría lograr con el acercamiento a un restablecimiento del balance hidrológico del acuífero por la recuperación de caudales y su consecuente impacto en el ecosistema del Valle de Atlixco.



Facultad de Ingeniería  
UNAM

INVESTIGACIONES PARA REINFILTRACIÓN  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE ATLIXCO

OBRAS PROPUESTAS

Tesis Profesional

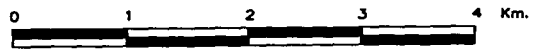
Zava V. Serrato Sandoval      Figura 14

**SIMBOLOGÍA**

Norias ———— ○

Presa ———— ◊

Noria de prueba ———— ○





## **CAPÍTULO VI.**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 CONCLUSIONES**

##### PRIMERA

Las condiciones hidrogeológicas del Valle de Atlixco son propicias para recibir una recarga inducida.

##### SEGUNDA

De los 16 aforos que se realizaron con molinete hidráulico en los canales que colectan las descargas de los manantiales Axocopan, Atlimeyaya y Metepec, se midió un caudal de 3.352 m<sup>3</sup>/seg. De la mayor parte de este caudal se desconoce su distribución y su uso, dado que no se cuenta con un esquema hidrográfico actualizado, pero se sabe que la mayor parte se desperdicia.

##### TERCERA

A reserva de que se precise el volumen excedente para reinfiltrar, este se estima del orden mínimo de 2 m<sup>3</sup>/seg.

##### CUARTA

De las doce pruebas de bombeo realizadas, se desprende que la capacidad transmisora de los pozos del valle es muy reducida, ya que solo se tienen dos valores apreciables de este parámetro en los pozos 15 Sur, Las Palmas y Las Monjas con  $2.16 \times 10^{-3}$ ,  $2.4.11 \times 10^{-2}$  y  $2.28 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/seg, respectivamente. De los 9 pozos restantes, 3 no fueron interpretables y en los otros 6 el valor de transmisividad tiene un promedio de  $2.756 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/seg.

##### QUINTA

Las profundidades al nivel del agua subterránea desde la superficie del terreno varían entre 10 y 65 metros, reducidas en relación a las de 90 metros probadas con éxito en Mixcoac, D.F. en 1958 y de 115 metros en la Cd. Satélite, México., en 1993. Por el mismo motivo la solución más recomendable es reinfiltrar el agua en pozos de absorción (el fondo del pozo), queda por encima del nivel de saturación y no de infiltración en los que el agua reinfiltrada se lleva directamente a la zona saturada.

##### SEXTA

De acuerdo a la anterior conclusión, en el Valle de Atlixco se considera como una de las maneras más viables para reinfiltrar el agua es la absorción por medio de pozos de gran diámetro y drenes radiales.

#### SEPTIMA

Otra de las opciones viables para el aprovechamiento del agua de los manantiales y ríos, es el almacenamiento del agua por medio de una presa, con la finalidad de reinfiltrar el agua al valle por medio del denso fracturamiento que presentan las rocas en el vaso.

## 6.2 RECOMENDACIONES

#### PRIMERA

Con el éxito obtenido en la prueba de infiltración en la noria de prueba, se sugiere la construcción de una batería de norias como el modelo propuesto en la figura 22, conformando así un frente óptimo de reinfiltración. En una obra de este tipo la superficie filtrante es de 195 metros cuadrados (superficie paredes y fondo). La superficie de un pozo de 20 metros de profundidad y 0.903 metros de diámetro, es de solo 22 metros cuadrados. El costo es mínimo comparado contra un pozo profundo.

#### SEGUNDA

No se debe efectuar ningún proceso de reinfiltración sin antes haber realizado los tratamientos químicos y bacteriológicos correspondientes.

#### TERCERA

Probar por segunda ocasión mediante ensayos de bombeo los pozos Valle Sur, Carolina 2 y FOVISSTE, debido a que por razones de operación los tiempos de observación fueron insuficientes.

#### CUARTA

Si se opta por la construcción de la presa se sugiere realizar los estudios geológicos de detalle, hidrológicos, topográficos, tenencia de la tierra, geotécnicos, sociales y de impacto ambiental.

#### QUINTA

Llevar una supervisión estricta en las nuevas perforaciones que se lleven para abastecimiento de agua potable. Esto significaría contar con corte litológico formado por un geólogo y que pueda correlacionarse satisfactoriamente con un registro eléctrico. En el mismo orden de ideas hacer lo mismo con el aforo de gastos escalonados.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, J.G. y Ordoñez, E., 1895; **Expedición científica al Popocatepetl**; México, D.F. Comisión Mexicana. P 3 – 48.

Álvarez Jr. M., 1962; **Provincias Fisiográficas de la República Mexicana**, Bol. Soc. Geol. México.

INEGI; Atlas 1998; **Atlas Ejidal del Estado de Puebla**; V.21, México, D.F.

Boletín de Informaciones y Estudios No.45, Febrero de 1986; **Recarga Artificial de Acuíferos**; Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Servicio Geológico de España.

Boletín del Instituto de Geografía No. 27, 1993; **Investigaciones Geográficas**; 1ª. Edición, UNAM, México, D.F.

Buol, 1969; **Génesis y Clasificación de Suelos**; Tabla de las Unidades Cartográficas de Suelos para el Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO.

Cepeda, L., 1985, **Apuntes de Petrología Ígnea**; Facultad de Ingeniería, UNAM; México, D.F.

Consejo de Recursos Minerales, 1995; **Monografía Geológico-Minera del Estado de Puebla**; SECOFI.

Custodio E., Llamas M.R., 1983; **Hidrología Subterránea**; 2ª. Edición; Ed. Omega; Tomo 1 y Tomo 2.

Davis S:N: y De Wiest R., 1971; **Hidrogeología**; Ed. Ariel; Barcelona.

De Galiana M.T., 1985; **Larousse Técnico**; Ed. Larousse, México, D.F.

De Wiest, Roger J.M., 1965; **Geohidrology**; Agua Subterránea; New York.

Delgado, G.H. y Brugman, M., 1995; **Monitoreo de los Glaciares del Popocatepetl**; Estudios realizados durante la crisis de 1994 – 1995, Centro Nacional de Desastres y Universidad Nacional Autónoma de México, p. 221 – 234.

Demaint Alain, Mauvois R., Silva L., 1976; **El Eje Neovolcánico Transmexicano**; México.

Freeze A. R. y Cherry J. A., 1979; **Groundwater**; Prentice Hall, Inc.

Fuentes, A. L., 1975; **El paisaje en el pie del monte poblano de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl**; Boletín Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (6), p. 97 – 116.

García de Miguel J. M., 1976; **Petrología De Rocas Ígneas**; Fundación Gómez Pardo; Madrid.

Garfías, V. y Chapin, T, 1944; **Geología de México**; Ed. Jus. 198 p.

GEOCALLI, S.A. Consultores, 1982; **Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona de Atencingo-Atlixco, Pue.**

González H. A., 2000; **Estudios de Detalle Estratigráfico Y Sedimentológico del Lahar de San Nicolás en el Flanco Noreste del Volcán Popocatepetl**; Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM.

INEGI, 2000; <http://www.inegi.gob.mx/entidades/espanol/pue/pue.html>; **Aspectos Geográficos de Puebla**

INEGI, 1983; **Carta Geológica**; Hoja Atlixco E14-B52; Esc. 1:50 000.

INEGI, 1983; **Carta Topográfica**; Hoja Atlixco E14-B52; Esc. 1:50 000.

INEGI, 1983; **Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas y Superficiales**; Hoja Atlixco E14B52; Esc. 1:250 000.

INEGI, 1990; **División Geostadística Municipal**; Carta de Climas 1:1 000 000, Mapa de Carreteras Estado de Puebla, 1: 300 000.

Jung Jean, 1958; **Precis de Pétrographie; Roches Sedimentaries Metamorphiques et Éruptives**; ed, Masson. París – VI.

Joseph M. Trefethen, Julio de 1984; **Geología para Ingenieros**; Ed. Continental S.A. de C.V.

Luca Ferrari, 2000; **Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década**; Boletín de la Soc. Geológica Mexicana, Vol. III, (2000); pág.84 – 92.

López Ramos, E., 1976; **Geología General y de México**; Tomo III, 4ª edición.

Lugo Hubp, J., 1990; **El Relieve de la República Mexicana**; Revista Inst. de Geología, UNAM.

Maderey Rascón L. E., 1967; **Estudio Preliminar sobre las Aguas Subterráneas en México**; Instituto de Geografía, UNAM.; México, D.F.

Macías G., Arias P. y Sarmiento A., 1998; **Investigación sobre las Posibilidades de Reinfiltrar Agua en el Valle de Atlixco**; Facultad de Ingeniería, DICT, UNAM.

Macías G., Arias P. Y Vidal G. 1999; **Artículo de Investigación sobre las posibilidades de reinfiltrar agua en el Valle de Atlixco, Pue.** ; Fac. Ingeniería, UNAM.

ESTADÍSTICA  
DE LA INGENIERÍA

Macías J. L., Carrasco G., y Siebe C., 1995; **Zonificación de peligros volcánicos del Popocatepetl**; Estudios realizados durante la crisis de 1994 – 1995, Centro Nacional de Prevención de Desastres y Universidad Nacional Autónoma de México, p. 79 – 91.

PEGSA S.A., 1979; **Perforaciones y Estudios Geológicos**; Informe No. 79024.

Pettijohn. F. J., 1963; **Rocas Sedimentarias**; Ed. Universitarias de Buenos Aires.

Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla, 1984; **Guía Turística, Histórica y Geográfica de México**; Ed. Promexa, México.

SARH, 1994; **Manual para evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos**; México, D.F.

Secretaría de Gobernación, 1987; **Los Municipios de Puebla**; V.21, Mazatlán, Sin.

Siebe ., Abrams M. y Macías J. L., 1995; **Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del volcán Popocatepetl**; Estudios realizados durante la crisis de 1994 – 1995, entre Nacional de Prevención de Desastres y Universidad Nacional Autónoma de México, p. 195 – 220.

Siebe C, Macías J. L., Abrams M., Rodríguez S., Castro R. Y Delgado H., 1995; Quaternary Explosive volcanism and Pyroclastic Deposits in East Central Mexico: Implications for future Hazards, Geological Society of America Annual Meeting, Field Trip Guide Book # 1, 47 p.

Simons Robinson E., 1990; **Geología Física Básica**; Ed. Limusa.

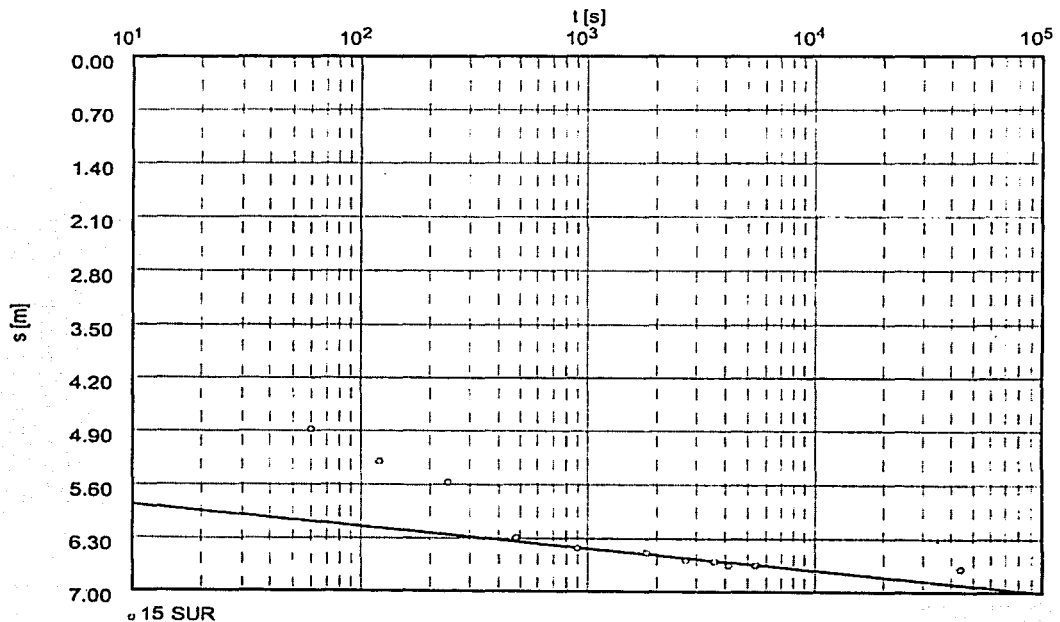
Tamayo, L., 1984; **Geografía Moderna de México**, Ed. Trillas, México, D.F.

Villanueva M. e Iglesias L.; **Pozos y Acuíferos**; Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo; Div. de Aguas Subt. del Instituto Geológico y Minero de España; Tomo I y II.

Viniegra Osorio F., 1992; **Geología Histórica de México**; 1ª. Edición, Facultad de Ingeniería, UNAM.

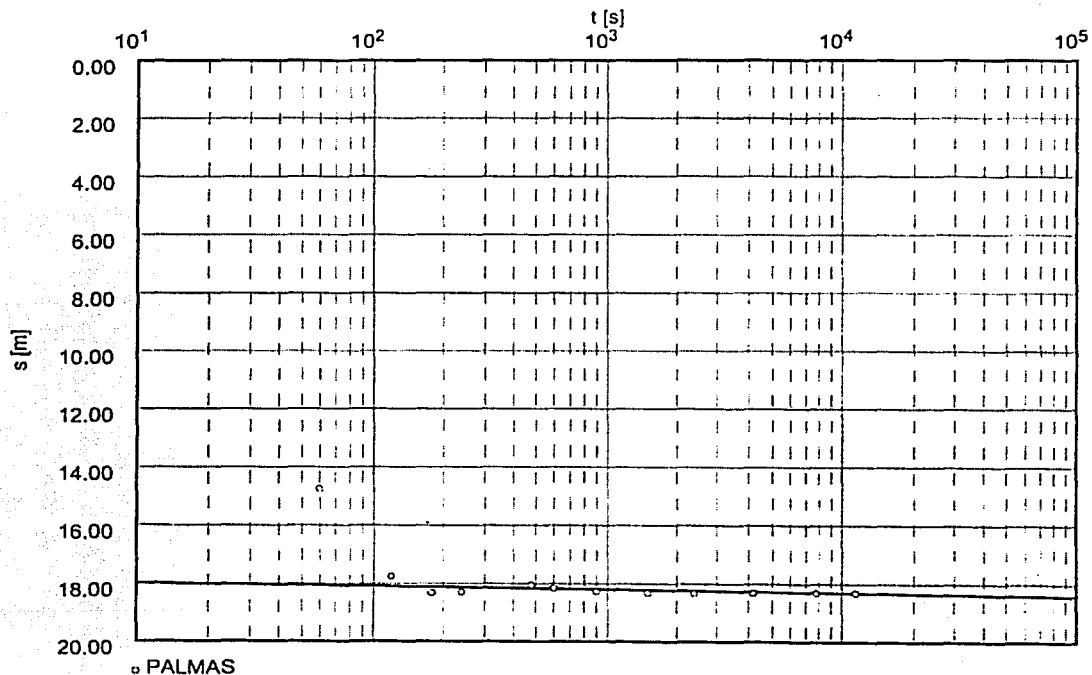
# APÉNDICE

WATERLOO HYDROGEOLOGIC		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB		Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001	
Pumping Test No.1				Test conducted on: Zaira Serrato	
15 SUR				15 SUR	
Discharge 34.00 l/s				Distance from the pumping well 0.200 m	
Static water level: 0.000 m below datum					
	Pumping test duration		Water level		Drawdown
	(s)		(m)		(m)
1	60		4.880		4.880
2	120		5.300		5.300
3	240		5.570		5.570
4	480		6.290		6.290
5	900		6.425		6.425
6	1800		6.485		6.485
7	2700		6.585		6.585
8	3600		6.600		6.600
9	4140		6.650		6.650
10	5400		6.650		6.650
11	44160		6.695		6.695



Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $2.16 \times 10^{-2}$

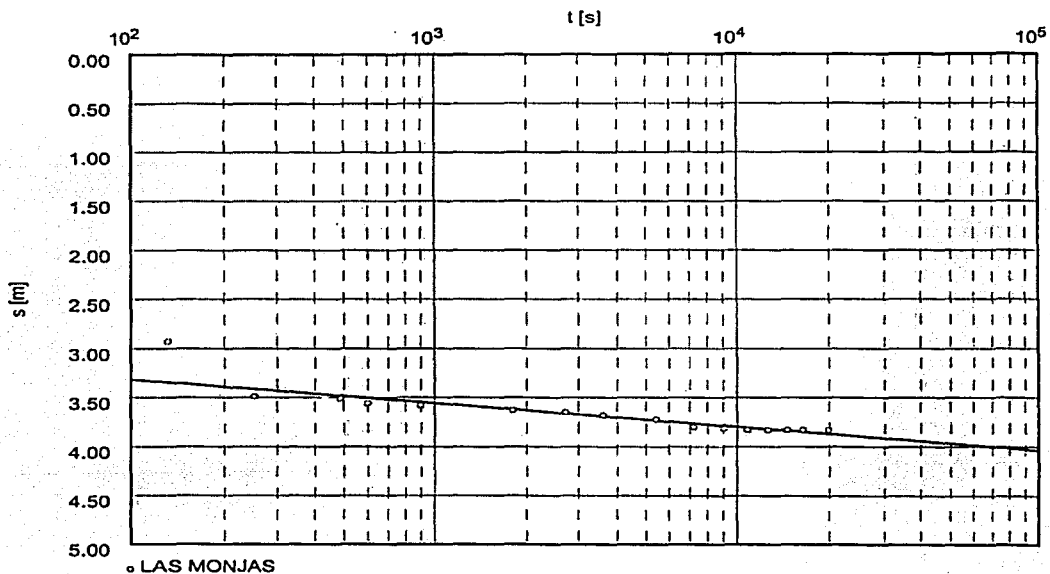
WATERLOO HYDROGEOLOGIC		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB		Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001	
Pumping Test No.2				Test conducted on: Zaira Serrato	
PALMAS				PALMAS	
Discharge 25.00 l/s				Distance from the pumping well 0.150 m	
Static water level: 0.000 m below datum					
	Pumping test duration	Water level	Drawdown		
	(s)	(m)	(m)		
1	60	14.750	14.750		
2	120	17.760	17.760		
3	180	18.320	18.320		
4	240	18.290	18.290		
5	480	18.050	18.050		
6	600	18.170	18.170		
7	900	18.270	18.270		
8	1500	18.310	18.310		
9	2400	18.320	18.320		
10	4200	18.300	18.300		
11	7800	18.300	18.300		
12	11400	18.310	18.310		



Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]: 4.11 x 10<sup>-2</sup>

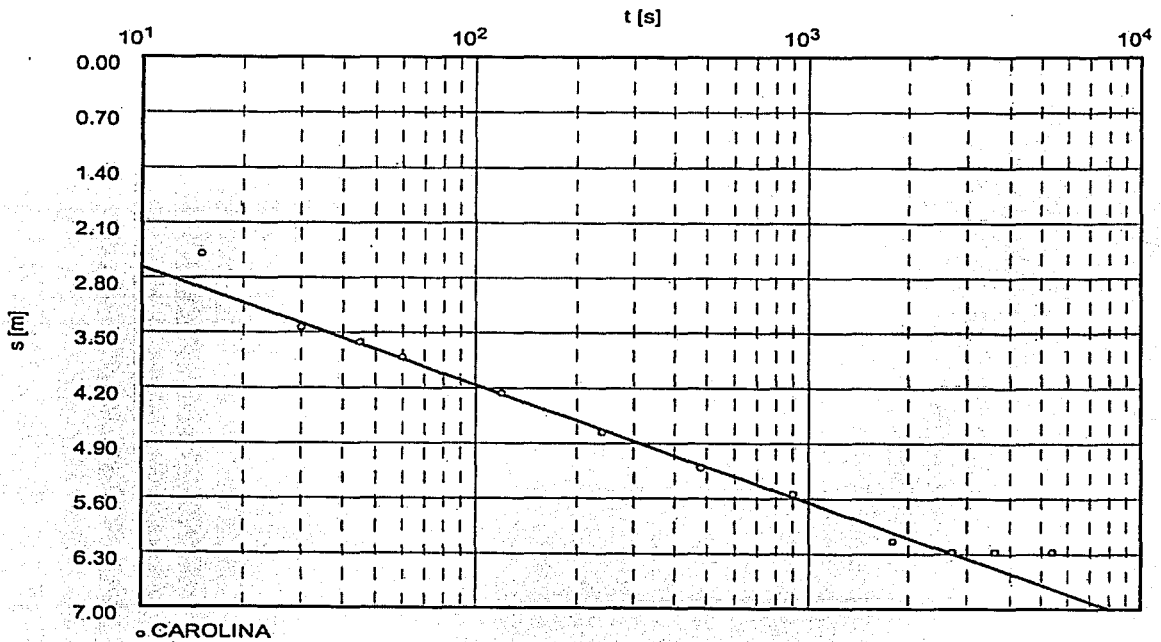


WATERLOO HYDROGEOLOGIC		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB	Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001
Pumping Test No.3		Test conducted on: Zaira Serrato	
LAS MONJAS		PALMAS	
Discharge 30.00 l/s		Distance from the pumping well 0.150 m	
Static water level: 0.000 m below datum			
	Pumping test duration	Water level	Drawdown
	(s)	(m)	(m)
2	131	2.930	2.930
3	252	3.490	3.490
4	487	3.510	3.510
5	600	3.560	3.560
6	900	3.630	3.580
7	1800	3.650	3.630
8	2717	3.680	3.650
9	3600	3.720	3.680
10	5400	3.800	3.720
11	7204	3.810	3.800
12	9050	3.830	3.810
13	10810	3.830	3.830
14	12600	3.830	3.830
15	14400	3.830	3.830
16	16200	3.830	3.830
17	19816	3.830	3.830



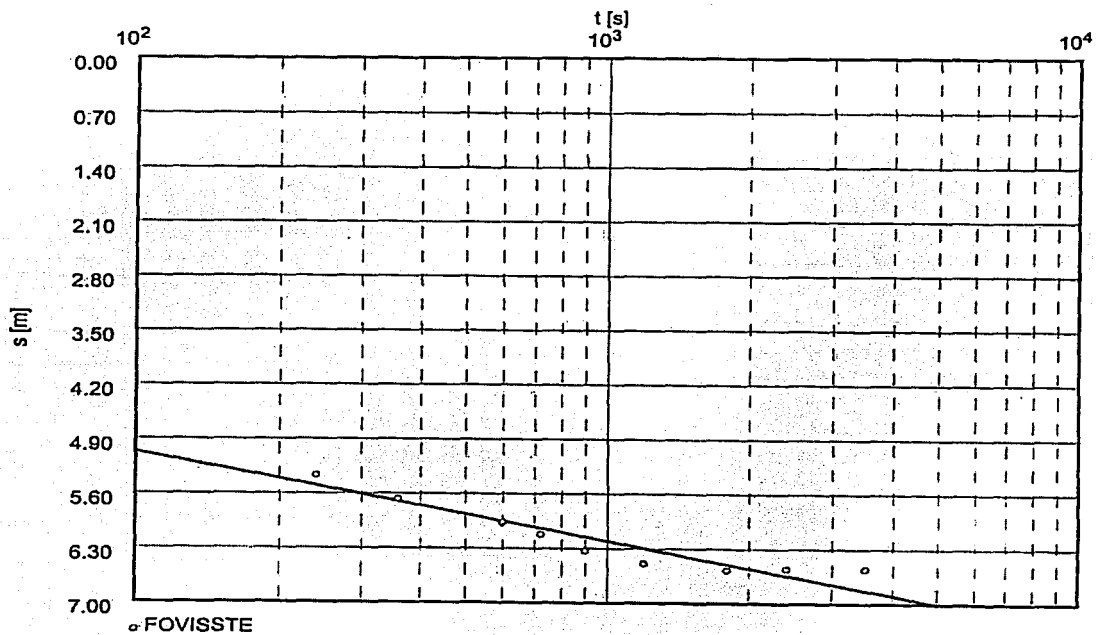
Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $2.28 \times 10^{-2}$

WATERLOO HYDROGEOLOGY	Pumping test analysis	Project: Atlixco		
	Time-Drawdown-method after COOPER AND JACOB	Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001		
Pumping Test No.4	Test conducted on: Zaira Serrato			
CAROLINA	CAROLINA			
Discharge 40.00 l/s	Distance from the pumping well 0.200 m			
Static water level: 0.000 m below datum				
	Pumping test duration	Water level	Drawdown	
	(s)	(m)	(m)	
2	15	2.500	2.500	
3	30	3.440	3.440	
4	45	3.620	3.620	
5	60	3.810	3.810	
6	120	4.260	4.260	
7	240	4.760	4.760	
8	480	5.210	5.210	
9	900	5.540	5.540	
10	1800	6.140	6.140	
11	2700	6.270	6.270	
12	3600	6.270	6.270	
13	5400	6.270	6.270	



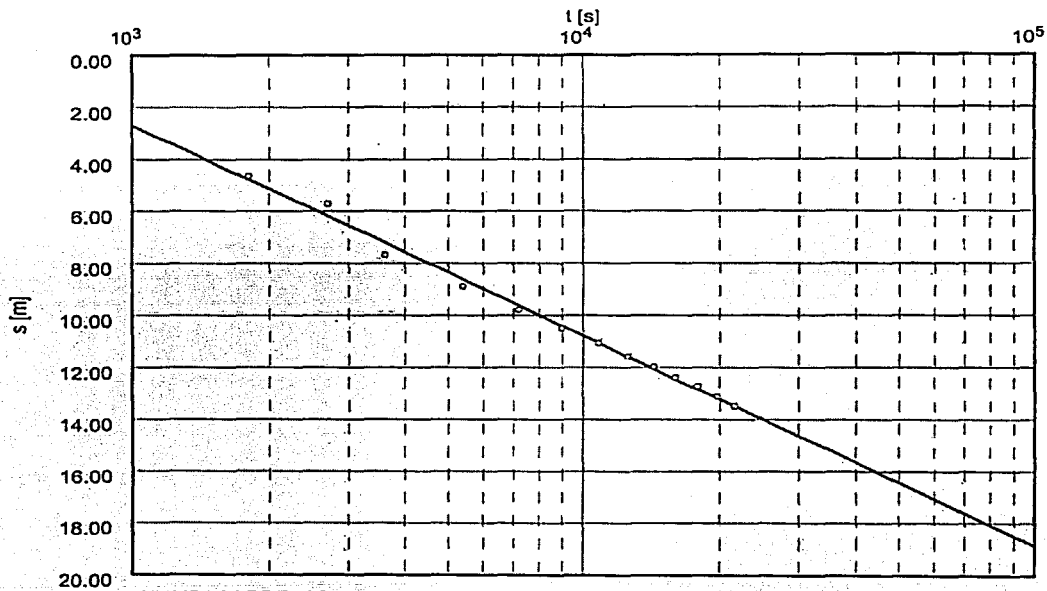
Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $4.91 \times 10^{-3}$

WATERLOO HYDROGEOLOGY		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwmethod after COOPER AND JACOB		Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001	
Pumping Test No.5			Test conducted on: Zaira Serrato		
FOVISSTE			FOVISSTE		
Discharge 11.50 l/s			Distance from the pumping well 0.127 m		
Static water level: 0.000 m below datum					
	Pumping test duration	Water level	Drawdown		
	(s)	(m)	(m)		
2	240	5.370	5.370		
3	360	5.670	5.670		
4	600	5.970	5.970		
5	720	6.120	6.120		
6	900	6.330	6.330		
7	1200	6.490	6.490		
8	1800	6.570	6.570		
9	2400	6.550	6.550		
10	3500	6.550	6.550		



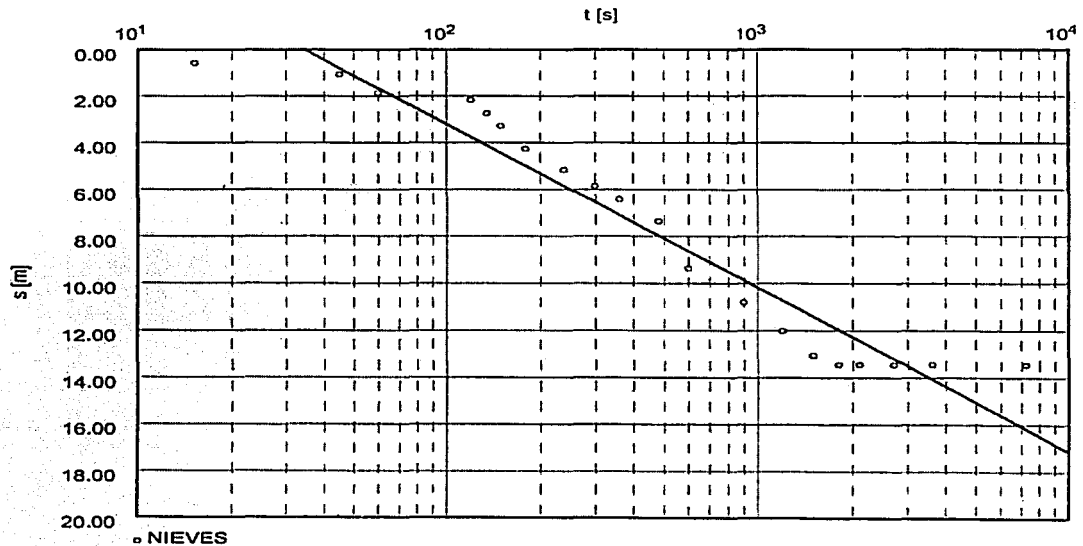
Transmissivity [ $m^2/s$ ]:  $1.84 \times 10^{-3}$

WATERLOO HYDROGEOLOG	Pumping test analysis	Project: Atlixco	
	Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB	Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001	
Pumping Test No.6		Test conducted on: Zaira Serrato	
TUMBACARRETAS		TUMBACARRETAS	
Discharge 4.00 l/s		Distance from the pumping well 0.150 m	
Static water level: 0.000 m below datum			
	Pumping test duration	Water level	Drawdown
	(s)	(m)	(m)
2	1800	4.630	4.630
3	2700	5.720	5.720
4	3600	7.670	7.670
5	5400	8.880	8.880
6	7200	9.795	9.795
7	9000	10.485	10.485
8	10800	11.055	11.055
9	12600	11.555	11.555
10	14400	11.965	11.965
11	16200	12.375	12.375
12	18000	12.730	12.730
13	19800	13.110	13.110
14	21600	13.480	13.480



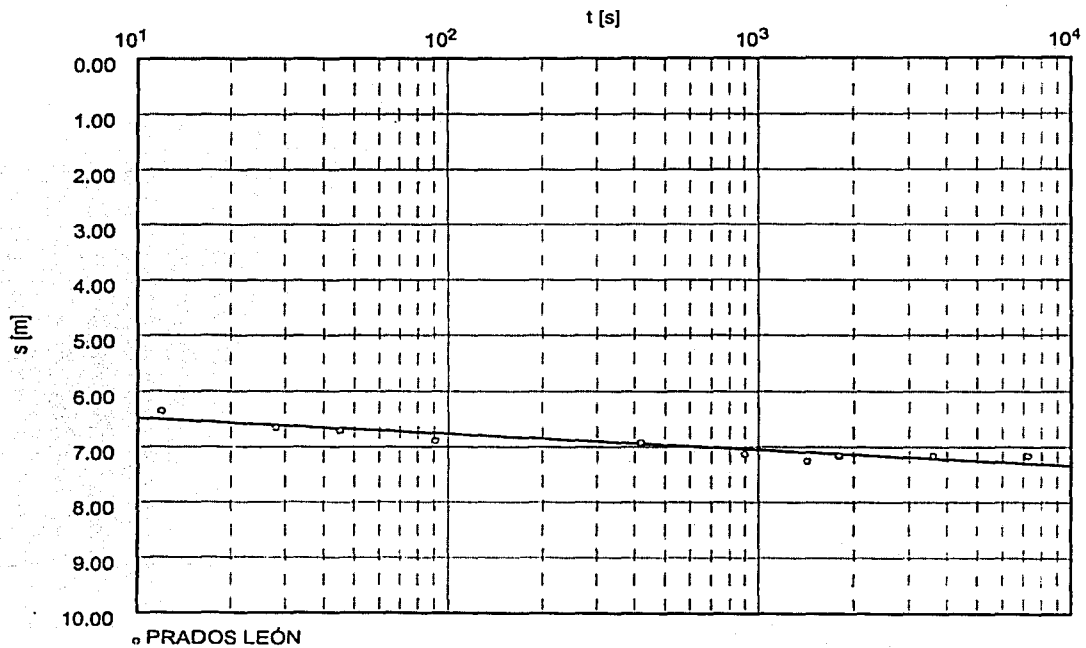
Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $9.05 \times 10^{-5}$

WATERLOO HYDROGEOLOGIC		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB		Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001	
Pumping Test No.8			Test conducted on: Zaira Serrato		
NIEVES			NIEVES		
Discharge 1.70 l/s			Distance from the pumping well 0.127 m		
Static water level: 0.000 m below datum					
	Pumping test duration (s)	Water level (m)	Drawdown (m)		
2	15	0.570	0.570		
3	45	1.500	1.500		
4	60	1.870	1.870		
5	120	2.170	2.170		
6	135	2.740	2.740		
7	150	3.280	3.280		
8	180	4.260	4.260		
9	240	5.170	5.170		
10	300	5.850	5.850		
11	360	6.420	6.420		
12	480	7.340	7.340		
13	600	9.370	9.370		
14	900	10.800	10.800		
15	1200	12.010	12.010		
16	1500	13.070	13.070		
17	1800	13.440	13.440		
18	2100	13.440	13.440		
19	2700	13.440	13.440		
20	3615	13.440	13.440		
21	7230	13.440	13.440		



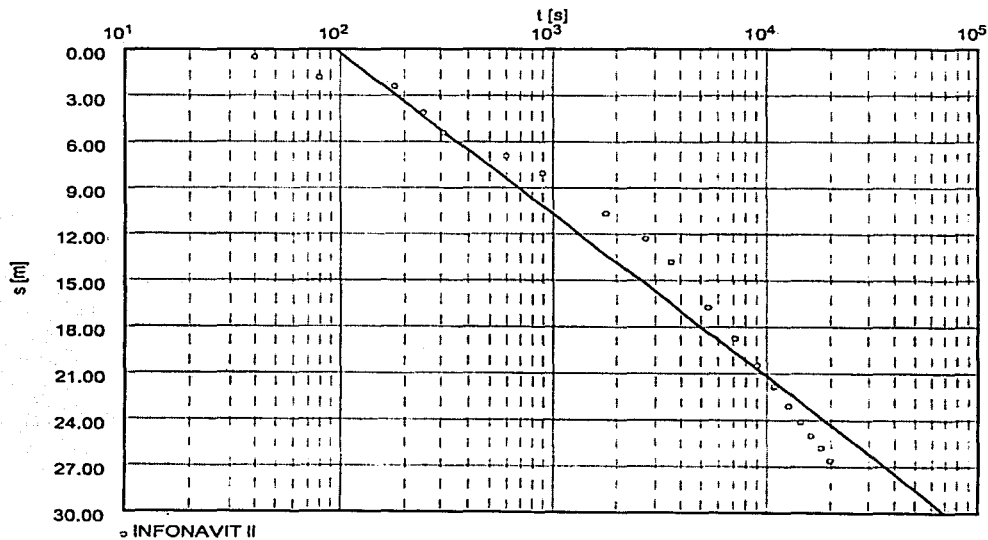
Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $4.46 \times 10^{-5}$

WATERLOO HYDROGEOLOGIC		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB	Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001
Pumping Test No.10 PRADOS LEÓN Discharge 14.16 l/s		Test conducted on: Zaira Serrato PRADOS LEÓN Distance from the pumping well 0.127 m	
Static water level: 0.000 m below datum			
	Pumping test duration (s)	Water level (m)	Drawdown (m)
2	12	6.350	6.350
3	28	6.650	6.650
4	45	6.710	6.710
5	91	6.890	6.890
6	420	6.920	6.920
7	900	7.130	7.130
8	1423	7.240	7.240
9	1800	7.160	7.160
10	3600	7.160	7.160
11	7200	7.160	7.160
12	7245	7.160	7.160



Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $9.06 \times 10^{-3}$

WATERLOO HYDROGEOLOGIC		Pumping test analysis Time-Drawdown-mwthod after COOPER AND JACOB	Project: Atlixco Evaluated by: ZAIRA SERRATO Date: 26 - 10 - 2001
Pumping Test No.11		Test conducted on: Zaira Serrato	
INFONAVIT II		INFONAVIT II	
Discharge 34.00 l/s		Distance from the pumping well 0.127 m	
Static water level: 0.000 m below datum			
	Pumping test duration	Water level	Drawdown
	(s)	(m)	(m)
2	40	0.500	0.500
3	80	1.830	1.830
4	180	2.430	2.430
5	249	4.100	4.100
6	309	5.420	5.420
7	600	6.930	6.930
8	900	8.020	8.020
9	1800	10.670	10.670
10	2700	12.330	12.330
11	3600	13.820	13.820
12	5400	16.730	16.730
13	7200	18.760	18.760
14	9000	20.490	20.490
15	10800	21.850	21.850
16	12600	23.050	23.050
17	14400	24.110	24.110
18	16200	25.000	25.000
19	18000	25.800	25.800
20	19800	26.620	26.620



Transmissivity [m<sup>2</sup>/s]:  $5.94 \times 10^{-4}$