



**Universidad Autónoma de Querétaro**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Maestría en Ciencias**

**“ Modelo del mecanismo de agrietamiento en el  
Valle y Zona Metropolitana de Querétaro “**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

Presenta:

**Alfonso Alvarez Manilla Aceves**

Dirigido por:

**Dr. Eduardo Rojas González**

**DEPFI, UAQ.**

No Adq H63888

No. Título TS

Clas. 624.176

A473m

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE INGENIERÍA

(MECÁNICA DE SUELOS)

**MODELO DEL MECANISMO DE AGRIETAMIENTO EN EL VALLE Y ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO.**

**T E S I S**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERÍA  
(MECÁNICA DE SUELOS)**

Presenta:

**Alfonso Alvarez Manilla Aceves**

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

SINODALES

Dr. Eduardo Rojas González  
Presidente

MI. María de la Luz Pérez Rea  
Secretario

Dr. Eulalio Juárez Badillo  
Vocal

MI. Alfonso Rico Rodríguez  
Suplente

MI. José Alfredo Zepeda Garrido  
Suplente

Ing. Jorge Martínez Carrillo  
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Sergio Quesada Aldana  
Director de Investigación y Posgrado

## **Resumen:**

En la Provincia Fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana existe una gran cantidad de acuíferos alojados en gruesas capas de materiales granulares que rellenaron las cuencas.

Usualmente la extracción del agua subterránea excede a la recarga, lo que ocasiona la profundización de la superficie piezométrica y por tanto la pérdida de sustentación hidráulica.

Las variaciones en las condiciones de frontera (recarga y extracción) producen los fenómenos transitorios de flujo hidrodinámico (bombeo) y deformación en tres fases: hundimiento, generación de grietas y crecimiento de fallas. Cuando la franja de declinación de la superficie piezométrica se sobrepone a un cambio en la topografía del basamento, se acrecienta la deformación.

Se desarrolló para esta tesis la ecuación de campo para predecir las deformaciones ocasionadas por el flujo hidrodinámico. Dicha ecuación se introdujo en un programa de computo que permite conocer las deformaciones en una retícula de puntos.

**Palabras Clave:** recarga, superficie piezométrica, fenómenos transitorios, flujo hidrodinámico, deformación, hundimiento, grietas y fallas.

## Summary:

Inside the Transmexican Volcanic Belt the basins are filled with several hundreds of meters of sediments which serve as natural underground reservoirs for the periodic rainfall and runoff from the surrounding mountains. If there does not exist substantial recharge, water table depletion appear and transient effects come about.

The problem of transient flow is a coupled one; the deformation of the grain skeleton (subsidence, compressibility, consolidation) is coupled to the ground water flow ( pumping ).

The wells cause a large reduction in the piezometric head, the flow of the descending water across compressible deposits increase the effective stress, produce consolidation and thus cause the "surface subsidence" in a three phases process:

1. Subsidence,
2. Tension crack, and
3. Growth faults

This thesis show up a equation that describes the transient flow and the deformation, a basic software was developed to predict collapse too.

**Key Words:** recharge, interior basin, depletion, transient flow, effective stress, piezometric head, compressibility, subsidence, collapse, tension crack and growth fault.

## **DEDICATORIA:**

Esta, como todas mis obras y trabajos están totalmente dedicados a mi Esposa Martha Verónica y mis Hijos: Alfonso, Martha Luz y Silvia Andrea, quienes con sus vivencias y emociones acrecientan mi pasión por la vida.

## **AGRADECIMIENTOS:**

La formación de una persona está compuesta por las experiencias, ejemplos y vivencias que tiene a diario con sus semejantes, por lo que creo necesario agradecer a todos su aportación para la persona que ahora soy, pero quiero hacer especial énfasis a:

Desde el punto de vista académico agradezco a las Facultades de Ingeniería tanto de la Universidad Nacional Autónoma de México como a la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro por mi formación como profesional.

Mis suegros el Sr. Juan Orendain Cárdenas y la Sra. Luz María Munguía de Orendain, a mi amigo el Ing. Guillermo Hernández Moedano quienes con su ejemplo y pláticas me han enseñado a vivir intensamente día a día.

A mis amigos los Ingenieros: Juventino García Becerra, Francisco Fernández Hernández, Raúl Romero Macías, Jesús Cuauhtémoc Orendain Munguía, , Angel Trejo Moedano, José Luis Salas Cruz, Richard Michael Poot Lima, Francisco Moreno Derbéz; por su gran amistad y apoyo incondicional, en el entendimiento que en este escrito hay grandes aportaciones tuyas, así como por sus contribuciones filosóficas de la vida diaria.

En las diferentes etapas de mi vida, por su amistad como de siempre, a: Ing. Juan Manuel Lesser Illades, Dr. Felipe Lara Beltrán, Ing. José Felipe Eduardo Ruíz Ruíz, Dr. Miguel Angel Arias Ruíz, Ing. David González Posadas, Sr. Gilberto Galvez Sánchez.

Al MI. José Alfredo Zepeda Garrido por crear la Escuela de Suelos Parcialmente Saturados en la Universidad Autónoma de Querétaro y en los Estados Unidos Mexicanos, así como por ubicarme y creer en mí como profesional.

A los Doctores: Luis Reyes Ávila, Gonzalo Alducin González, Luis Ferrer Argote y Jaime Horta Rangel, que me colocaron en otro nivel de conceptos y estimularon mi deseo por desarrollar nuevas formulaciones a los problemas de ingeniería, sin hacer ensayos sobre lo ya hecho y escrito.

Especial gratitud les tengo tanto al Dr. Eulalio Juárez Badillo y al MI Alfonso Rico Rodríguez por formar, ceder sus conocimientos a los profesionales de la mecánica de suelos y poner en alto la Ingeniería Geotécnica de los Estados Unidos Mexicanos en el mundo.

Al Dr. Paul Garnica Anguas y al MI. Alfonso Rico Rodríguez por brindarme la oportunidad de ser un miembro del selecto grupo de Investigadores Instituto Mexicano del Transporte.

# ÍNDICE:

<b>Resumen.</b>	i
<b>Summary.</b>	ii
<b>Dedicatoria.</b>	iii
<b>Agradecimientos.</b>	iv
<b>Índice.</b>	v
<b>Índice de cuadros.</b>	vii
<b>Índice de figuras.</b>	viii
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>CAPÍTULO 1. Los fenómenos de hundimiento, colapso y agrietamiento; estado actual del conocimiento.</b>	3
1.1 Actividades naturales.	3
1.1.1 Hundimiento por solución de la roca o del agente cementante del suelo.	3
1.1.2 Subsistencia por terremotos y tectónica.	4
1.2 Actividades antropogénicas.	5
1.2.1 Hundimiento por extracción de agua subterránea, hidrocarburos y vapor.	6
1.2.1.1 Extracción de agua subterránea.	6
1.2.1.2 Extracción de gas, petróleo y vapor.	9
1.2.2 Minería.	10
<b>CAPÍTULO 2. Estudios de campo.</b>	11
2.1 Columna geológica y su relación con la Mecánica de Suelos.	11
2.2 Geología del subsuelo (registros geofísicos y cortes litológicos de pozos).	14
2.2.1 Zonificación Geohidrológica del Valle de Querétaro.	16
2.2.2 Elevación del nivel estático.	19
2.2.3 Evolución y cambio de almacenamiento negativo.	23



<b>CAPÍTULO 3. Ensayes de laboratorio.</b>	27
3.1 Parámetros de compresibilidad para las tobas Cuesta China (Tstcc).	28
<b>CAPÍTULO 4. Modelo computacional del fenómeno acoplado.</b>	31
4.1 Ecuaciones de continuidad.	34
4.2 Conservación de la masa.	36
4.3 Solución a la ecuación de flujo-deformación.	38
4.4 Modelo computacional para determinar la distribución del hundimiento.	40
4.4.1 Generalidades del programa de simulación.	42
4.4.2 Ejemplo, cálculo y características de la evolución del asentamiento en el Municipio de Querétaro.	45
<b>CAPÍTULO 5. Conclusiones y Recomendaciones para trabajos futuros.</b>	54
5.1 Conclusiones.	54
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.	55
<b>Bibliografía.</b>	56
<b>Anexo A: Programa para el cálculo del asentamiento según declinación del nivel estático.</b>	62
<b>Anexo B: Resultados del análisis del hundimiento (m) para los períodos de Esfuerzo: 365, 730, 1095, 1460, 1825, 2190, 2555, 2920 y 3285 días.</b>	67
<b>Lista de símbolos.</b>	73

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Movimientos Verticales, causas y efectos	6
2.1	Relación entre las columnas geológica y geotécnica.	14
2.2	Celdas de balance y resultado del cambio de almacenamiento.	22
2.3	Datos del esfuerzo efectivo $\sigma'(t/m^2)$ , presión de poro $u$ ( $t/m^2$ ) y esfuerzo efectivo ( $\sigma'(t/m^2)$ ) para el Pozo 1817A en función del corte litológico y posición del nivel estático en los años de 1989 y 1998. El incremento del esfuerzo efectivo en el lapso fue de $60 t/m^2$ lo que puede ocasionar ruptura de granos.	25
4.1	Datos de alimentación al programa de simulación de hundimiento.	43
4.2	Datos y parámetros para el uso del programa de simulación de hundimiento en el Valle y Zona metropolitana de Querétaro.	44

## ÍNDICE DE FIGURAS:

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	Creación de karst por solución de masas de rocas calcáreas, Formación El Doctor.	4
1.2a	Movimiento vertical inducido por un sismo a lo largo de un plano de falla.	5
1.2b	Hundimiento por reacomodo de suelos no consolidados durante un temblor.	5
1.2c	Hundimiento y alzamiento por balance de fuerzas en una cuenca sedimentaria.	5
1.3	Fases de la deformación: hundimiento, generación de grietas, crecimiento de fallas.	8
2.1	Mapa geológico general, Unidades Geológicas. Depósitos lacustres (Qla), basalto Unidad Cimatarío (TQbc); ignimbritas riolíticas Unidad Hércules (Tsth); tobas de caída libre Unidad Cuesta China (Tstcc); basalto Unidad Menchaca (Tmbm); tobas Unidad Mompaní (Titm); basalto y andesita Unidad San Pedrito (Tibsp); intrusivos Unidad Juriquilla (Tij).	12
2.2	Sección Geológica Oeste-Este, "Las Adjuntas-San Gregorio". Se distingue el contacto entre los materiales granulares y el basamento geotécnico (basalto de la Unidad Menchaca (Tmbm) así como la profundidad del nivel estático para los años 1989, 1992 y 1998.	13
2.3	Columna geológica, estratos compresibles y basamento geohidrológico, Pozo 1, Celanese Mexicana, Zona Industrial Benito Juárez.	15
2.4	Columna estratigráfica y las Unidades Geohidrológicas.	16
2.5	Plano de "Zonificación Geohidrológica" y localización de "Fallas Activas" de la Zona Metropolitana y Valle de Querétaro.	18
2.6	Elevación del Nivel Estático, Diciembre de 1989; equipotenciales en metros.	20

2.7	Elevación del Nivel Estático para Noviembre de 1998; cotas en metros, las números en círculo corresponden a las nueve celdas de balance.	20
2.8	Evolución del Nivel Estático para el período comprendido entre Diciembre de 1989 a Noviembre de 1998.	24
2.9	Corte litológico, posición del nivel estático y diagrama del esfuerzo Efectivo del Pozo 1817A.	26
3.1	Curva de compresibilidad, nivel de esfuerzos efectivos en campo para la toba de la Unidad Cuesta China (Tstcc); sus coeficientes de compresibilidad, Prueba 1.	29
3.2	Curva de compresibilidad, nivel de esfuerzos efectivos en campo para la toba de la Unidad Cuesta China (Tstcc); sus coeficientes de compresibilidad, Prueba 2.	30
4.1	Volumen elemental representativo (VER) donde se establece de manera euleriana la ecuación constitutiva del proceso de flujo-deformación.	34
4.2	Diagrama de flujo del programa para el cálculo de Flujo-Deformación.	40
4.2	Configuraciones de evolución del nivel estático de Diciembre de 1989 a Noviembre de 1998 y malla para el cálculo del asentamiento de 1989 a 1998.	41
4.3	Profundidad al basamento geotécnico formado por la Unidad Menchaca (Tmbm).	42
4.4	Relación gráfica entre el abatimiento y el asentamiento para los sectores Oriente y poniente del Valle de Querétaro.	45
4.6	Configuración del asentamiento para 365 días de esfuerzo (1989-1990).	48
4.7	Configuración del asentamiento para 730 días de esfuerzo (1989-1991).	48
4.8	Configuración del asentamiento para 1095 días de esfuerzo (1989-1992).	49
4.9	Configuración del asentamiento para 1460 días de esfuerzo (1989-1993).	49
4.10	Configuración del asentamiento para 1825 días de esfuerzo (1989-1994).	50

4.11	Configuración del asentamiento para 2190 días de esfuerzo (1989-1995).	50
4.12	Configuración del asentamiento para 2555 días de esfuerzo (1989-1996).	51
4.13	Configuración del asentamiento para 2920 días de esfuerzo (1989-1997).	51
4.14a	Configuración del asentamiento para 3285 días de esfuerzo (1989-1998).	52
4.14b	Zona de agrietamiento potencial por abatimiento del nivel estático.	52
4.15	Acoplamiento entre las grietas, fallas y el hundimiento durante 3285 días.	53

## **INTRODUCCIÓN.**

### **PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN:**

El propósito fundamental de la investigación fue el desarrollar una ecuación que combinara los procesos de flujo hidrodinámico y la deformación, esto es: simular el abatimiento del nivel estático en un medio compresible donde la extracción es mayor a la recarga para finalmente evaluar el hundimiento y demarcar las zonas críticas.

Estos fenómenos se presentan en diversos valles de la Subprovincia Fisiográfica de la Depresión del Bajío, que comprende: Abasolo, Silao, Irapuato, Salamanca, Celaya y, en el sector oriental, el Valle y Zona metropolitana de Querétaro.

### **JUSTIFICACIÓN:**

Hasta hace algún tiempo, la mayoría de los investigadores del fenómeno de hundimiento en el Valle de Querétaro se habían enfocado a describir el problema de una manera cualitativa, sin bases para establecer las aportaciones a las deformaciones tanto de la declinación del nivel estático, estratos y espesores compresibles, características mecánicas e hidráulicas de cada uno de ellos como de la topografía del basamento.

En esta tesis se describe la columna geológica y su relación con la mecánica de suelos, se definen basamentos geotécnico, geohidrológico y geológico de la zona, así como sus características de compresibilidad. Esto permitirá que los trabajos futuros partan de bases sólidas del conocimiento primero del subsuelo y sus estructuras, posteriormente de sus propiedades geofísicas.

Además, se desarrolla una ecuación para el fenómeno acoplado de flujo-deformación, cuyo modelo computacional puede ser empleado para simular el abatimiento de la superficie piezométrica y las deformaciones inherentes del material geológico compresible.

## **ANTECEDENTES:**

El origen tectónico de la Faja Volcánica Transmexicana provocó la generación de fosas y pilares; las fosas se rellenaron con importantes espesores de materiales granulares entre los que destacan aluviones, lacustres y tobas con diferente grado de piroconsolidación. Ocasionalmente se encuentran derrames de lava.

Los suelos constitutivos de los valles inmersos en las fosas son ricos en materia orgánica y minerales, lo cual suscitó el crecimiento de la actividad agrícola; teniendo que extraer del subsuelo grandes volúmenes de agua para satisfacer tanto al ámbito agrícola como al público urbano y al industrial desarrollado posteriormente.

Por falta de conocimiento de la disponibilidad de agua subterránea y un plan de uso eficiente, se provocó la sobreexplotación del acuífero, es decir, que la recarga es inferior a la extracción, generando efectos transitorios debido a las variaciones de los valores de frontera (bombeo y recarga) con el tiempo.

Los efectos transitorios son: hundimiento regional, local, generación de grietas y crecimiento de fallas; los cuales han ocasionado grandes erogaciones económicas por gastos de conservación y mantenimiento de la infraestructura de los Municipios como de los inmuebles de los particulares. Los Valles más afectados son: León, Penjamo, Abasolo, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya en el Estado de Guanajuato y el de Querétaro en el Estado del mismo nombre.

## **CONTENIDO DE LA TESIS.**

El presente texto está dividido en cinco capítulos, los cuales se describen de manera breve a continuación:

En el Capítulo 1 se describen los conocimientos de los movimientos verticales y los efectos que provocan como los son el hundimiento, colapso, agrietamiento y crecimiento de fallas, estableciendo que tienen un origen dual: natural y antropogénico.

El Capítulo 2 muestra la distribución vertical y horizontal de las Unidades Geológicas, así como la evolución en el tiempo del nivel estático y su impacto en el campo de esfuerzos efectivos.

En el Capítulo 3 se presentan las propiedades mecánicas del primer estrato compresible. La Ecuación de Campo desarrollada para explicar el fenómeno transitorio de flujo- deformación y su modelo computacional se presentan en el Capítulo 4.

El Capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

## **CAPÍTULO 1. LOS FENÓMENOS DE HUNDIMIENTO, COLAPSO Y GRIETAS; ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.**

Los movimientos verticales del terreno tales como hundimiento, colapso y expansión, en la mayoría de los casos, son el resultado de las actividades humanas y naturales que cambian una condición interna del subsuelo.

Dentro de las actividades humanas se puede mencionar la extracción de fluidos (agua, gas, petróleo, vapor) y sólidos (minerales). Dentro de las actividades naturales que producen el hundimiento se encuentra la formación de cavidades en rocas calcáreas, terremotos y tectonismo (procesos de erosión y sedimentación). La predicción y ocurrencia son difíciles de establecer, pero, las condiciones favorables para su desarrollo son fácilmente reconocibles.

En los siguientes incisos y capítulos se describen las condiciones y mecanismos que dan origen al hundimiento, agrietamiento, crecimiento de fallas. Finalmente se establece un modelo computacional para simular el hundimiento provocado por la extracción de agua en un basamento rígido irregular.

### **1.1 Actividades naturales.**

Los movimientos verticales (hundimiento o colapso) del terreno por causas naturales pueden deberse a: solución de la roca o del agente cementante del suelo, tectonismo y terremotos.

#### **1.1.1 Hundimiento por solución de la roca o del agente cementante del suelo.**

El hundimiento y colapso por solución de la roca o del agente cementante del suelo aparece en las masas solubles de las rocas calcáreas, provoca que el agua de lluvia forme cavidades y que bajo ciertas condiciones se colapsen y hundan. Esto sucede principalmente en distritos de rocas calcáreas como la Península de Yucatán y la Formación El Doctor (Ksd) de la Sierra Gorda de Querétaro donde se producen *karst*, figura 1.1.





Figura 1.1. Creación de karst por solución de masas de rocas calcáreas, Formación El Doctor.

La disolución del agente cementante del suelo produce el colapso del terreno por dos procesos básicamente: tubificación y dispersión.

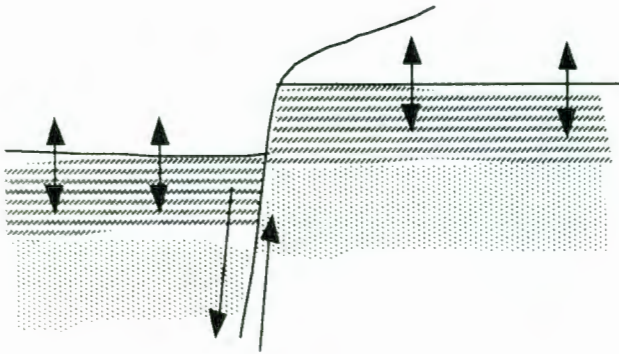
La tubificación se refiere a la erosión de suelos causados por flujo de agua sale por algún lado transportando partículas del suelo dentro de él. El fenómeno de dispersión está relacionado directamente a la mineralogía del suelo así como de la química del agua de poro.

Los suelos ricos en Sodio, como los existentes en el Valle de Guadalajara, Jalisco; se colapsan al dispersarse el Sodio por efecto de percolación del agua de lluvia ácida, apareciendo zonas redondeadas hundidas.

### **1.1.2 Subsistencia por terremotos y tectónica**

Los terremotos inducen el movimiento vertical (hundimiento) a lo largo de los planos de falla y el acomodo de los sedimentos no consolidados por vibración, figuras 1.2a y b.

El tectonismo se refiere a los movimientos de la tierra y a las estructuras de roca en general; J. Hall hace más de un siglo reconoció que la gruesa capa de sedimentos acumulados en los Apalaches provocó el hundimiento de una vasta área debido a que el peso de los sedimentos causó la expulsión del agua de los intersticios, originando el hundimiento por un lado y, debido a la isostasia, el alzamiento por otro. Ver figura 1.3.



Figuras 1.2a. Movimiento vertical inducido por un sismo a lo largo de un plano de falla.

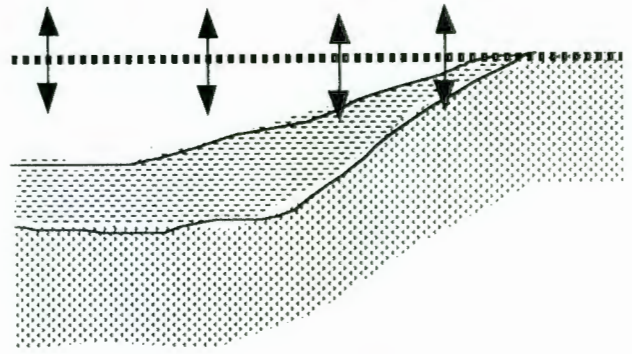


Figura 1.2b. Hundimiento por reacomodo de suelos no consolidados durante un temblor.



Figura 1.3. Hundimiento y alzamiento por balance de fuerzas en una cuenca sedimentaria.

## 1.2 Actividades antropogénicas

Las actividades humanas que ocasionan el fenómeno de hundimiento resultan de la extracción de algunos sólidos (minerales) y fluidos como son: gas, petróleo, vapor y principalmente agua subterránea.

El cuadro 1.1 resume los tipos de movimientos verticales, su descripción y efectos debido a las actividades antropogénicas.

Cuadro 1.1 Movimientos verticales, causas y efectos.

Movimiento	Descripción	Causas	Efectos	
1	Hundimiento regional	Movimiento hacia abajo de una gran área perfectamente delimitada debido a la sobreexplotación de un acuífero regional	Extracción de agua, gas, petróleo o vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inundación</li> <li>• Aparición de grietas</li> <li>• Crecimiento de Fallas</li> <li>• Distorsión estructuras</li> </ul>
2	Colapso del terreno	Movimiento hacia abajo de una área pequeña y limitada	Minería solución del cementante por presencia de ácidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distorsión y destrucción de estructuras</li> </ul>
3	Hundimiento de suelo y generación de grietas	Movimiento descendente y agrietamiento sobre un área limitada	abatimiento del NAF por construcción, evaporación o drenado de un acuitardo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distorsión y destrucción de estructuras</li> </ul>
4	Expansión del suelo	Movimiento ascendente	Expansión de arcillas por absorción de agua y rocas por liberación esfuerzos residuales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distorsión y destrucción de estructuras</li> </ul>

### 1.2.1 Hundimiento por extracción de agua subterránea, hidrocarburos y vapor.

El hundimiento superficial por la extracción de algún fluido es un fenómeno muy común que ocurre en cualquier zona donde grandes cantidades de agua, hidrocarburos o vapor son removidas sin que exista una adecuada recarga del acuífero. Como los movimientos son muy pequeños, su detección en un tiempo corto es muy difícil, además de que ocurre en áreas extensas y planas.

#### 1.2.1.1 Abatimiento de la superficie piezométrica (Extracción de agua subterránea).

La profundización del nivel estático reduce la presión de poro de tal modo que se incrementa el esfuerzo efectivo en la masa de suelo a partir de esa profundidad y el suelo se consolida. Por ejemplo; si el nivel declina 30 metros, el incremento del esfuerzo efectivo será de  $30 \text{ t/m}^2$  provocando una reducción de su volumen y por tanto el hundimiento.

La magnitud de hundimiento es función directa del espesor drenado, tipo de materiales geológicos y de sus propiedades mecánicas, lo cual determina el incremento en las presiones de la frontera y de la compresibilidad del estrato.

Para estratos de arenas limpias, la compresión es inmediata, mientras que para las arcillas y limos es muy lenta, dependiendo de su permeabilidad.

Para todos los estratos limo-arcillosos, el hundimiento es función directa de los fenómenos transitorios.

Cuando existe la necesidad de abatir el nivel del agua un cierto intervalo para la construcción de una cimentación profunda, el efecto es similar, el suelo se densifica debido al incremento del esfuerzo efectivo.

La figura 1.4 muestra el mecanismo de hundimiento, generación de grietas y crecimiento de fallas al abatir el nivel estático en una formación acuífera (compactación del acuífero).

Considere que en un acuífero conformado por materiales granulares descansando sobre un basamento rocoso impermeable de topografía irregular en donde el nivel estático coincide con la superficie del terreno al tiempo ( $t_0$ ). En este estado se considera en equilibrio. Al desaparecer los cuerpos de agua superficiales por consumo o evaporación y se perfora un pozo extrayendo un caudal  $Q$  que provoca la declinación del nivel estático en el tiempo ( $t_1$ ).

Cuando el volumen de extracción  $\Sigma S$  excedió la recarga  $\Sigma E$  en ( $t_2$ ) se genera un almacenamiento negativo en la Ecuación de Balance de Masa induciendo un volumen drenado "s" del acuífero. Las deformaciones se derivan tanto por los fenómenos de flujo transitorio como por la topografía del basamento resumiéndose en tres "fases":

Fase 1: Hundimiento,

Fase 2: Generación de grietas de tensión por sobreexplotación del acuífero, y

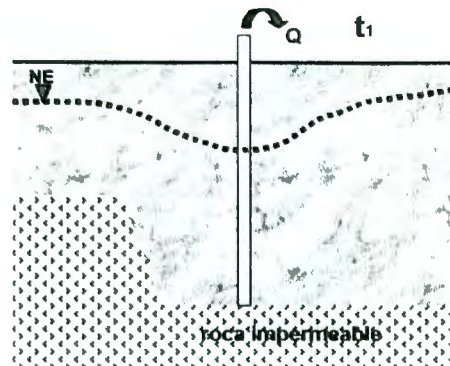
Fase 3: Crecimiento de fallas.

Dado que el hundimiento mayor aparece acoplado a la mayor profundidad del cono de abatimiento, la Fase 3 sucede al rellenarse la grieta y quedar dos bloques desplazados, se nota un desplazamiento entre estratos índice en los bloques ubicados en ambos lados del plano de movimiento, conforme se profundiza el nivel estático la diferencia de alturas se desarrolla, denominándolo Crecimiento de Fallas.



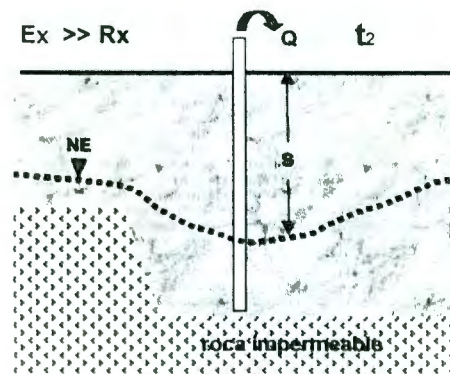
$t_0$

Formación Acuífera conformada por materiales granulares, el nivel piezométrico coincide con la superficie del terreno, el basamento geohidrológico no es completamente plano.



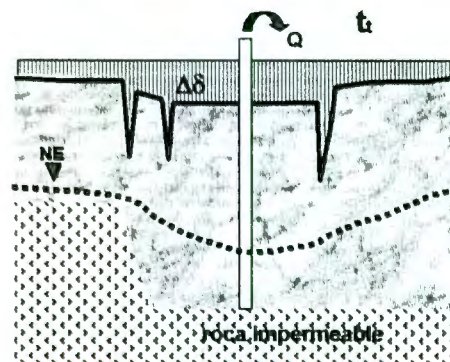
$t_1$

Perforación de pozos y extracción de un caudal "Q" que provoca la declinación del nivel piezométrico



$t_2$

El caudal de extracción "Q" de extracción "Ex" es mucho mayor al de recarga "Rx" ocasionando un almacenamiento negativo y drenado del acuífero ( $s$ ); disminución de la presión de poro.



$t$

El abatimiento de la superficie piezométrica, la disminución de la presión de poro y la topografía del basamento contribuyen a la deformación " $\Delta\delta$ " que ocasiona:  
**Fase 1. Hundimiento.**  
**Fase 2. Generación de grietas, y**  
**Fase 3. Crecimiento de fallas.**

Figura 1.4 Fases de la deformación: hundimiento, generación de grietas y crecimiento de fallas por abatimiento de la superficie piezométrica.

En los Estados Unidos Mexicanos el hundimiento es notorio en todas las zonas agrícolas y centros de población importante donde se han drenado potentes espesores de materiales granulares, entre ellas se puede mencionar los Valles de México, Atemajac-Tesistán, Querétaro, Celaya, Salamanca, Irapuato, Silao, Abasolo, Pénjamo, la Comarca Lagunera y otros más.

En ciudades costeras como Houston, Long Beach en EEUU y Venecia en Italia el abatimiento del nivel estático a un ritmo promedio de 5.5 cm/año provoca inundaciones periódicas.

En cuencas internas, el hundimiento regional ocasiona la inundación durante el período de lluvias, el Valle de Querétaro tiende a ser una cuenca endorreica debido a este concepto.

El agrietamiento y crecimiento de fallas ocurre en la periferia de las zonas de hundimiento, con desplazamientos pequeños a grandes de acuerdo a las características mecánicas e hidráulicas de los materiales geológicos involucrados, así como del volumen de agua extraído. El agrietamiento y crecimiento de fallas causan distorsión y destrucción de estructuras e infraestructura, tal como ha sucedido en la Zona Metropolitana de Querétaro.

### **1.2.1.2 Extracción de gas, petróleo y vapor.**

La extracción de gas, petróleo y vapor se lleva a cabo a profundidades mayores que las del agua subterránea, por lo que las presiones envueltas son más grandes.

La extracción de hidrocarburos resulta en una reducción de la presión de poro, lo cual permite transferir la presión al esqueleto de los materiales granulares y líticos del estrato.

Como ejemplo de la disminución de la presión de fluido se cita el trabajo presentado por Allen, 1973 donde se refiere al campo petrolero de Wilmington, Long Beach, Cal., donde establece que la compactación primeramente fue por el arreglo de los granos de arenas.

El flujo plástico apareció en los materiales suaves tales como micas y arcillas, así como en la ruptura de granos en los puntos de esfuerzo. Del total del hundimiento, dos terceras partes fueron atribuidas a las arenas y una tercera a los estratos intercalados de arcilla.

Allen y Mayuga, 1969; observaron que durante el período de máximo hundimiento, el sistema de fallas generado se formó desde profundidades de 450 a 520 metros, produciendo esfuerzos cortantes que dañaron los ademes de los pozos petroleros.

En lo que respecta a la extracción de vapor en campos geotérmicos un caso interesante es el que ofrece el de Travale-Radicondoli, Italia; donde en once años (1973-1984) de explotación, la red de bancos de nivel indican 26 cm de hundimiento, notando que la inyección de condensados logró mitigarlo. La explotación se efectúa entre los 800 y 1800 metros de profundidad. Como ejemplos de hundimiento debido al drenado de petróleo, gas y vapor existentes en trampas de materiales granulares se mencionan a:

- Long Beach, California con 9 metros de hundimiento debido a la extracción de petróleo entre los años de 1928 y 1979,
- Maracaibo, Venezuela con 3.3 metros de hundimiento entre 1926 y 1970 por extracción de petróleo,
- Po Delta de Italia, Niigata en Japón con un hundimiento de 2.5 metros por extracción de gas.
- Campo Geotérmico de Tejamaniles, Michoacán, Estados Unidos Mexicanos, 16 cm por extracción de vapor.

### **1.2.2 Minería.**

La extracción de materiales tales como carbón, yeso, sulfuros diseminados y sal entre otros, resulta en un efecto de hundimiento durante la operación de las minas, y algunas veces, de muchos años después. Este fenómeno de hundimiento también puede ocurrir durante la construcción de túneles.

Existen tres formas de colapso en minas: falla de techo, falla de pilar y falla en la cimentación del pilar. En los Estados Unidos Mexicanos este problema se ha presentado en los distritos mineros de Real del Monte y Pachuca, así como en la Minera Carbonífera de Río Escondido. Las zonas de hundimiento son fácilmente reconocibles en fotografías aéreas.

## **CAPÍTULO 2. MEDICIONES DE CAMPO.**

El fenómeno de agrietamiento y crecimiento de fallas por abatimiento de la superficie piezométrica se da en el Valle de Querétaro. Para establecer su mecanismo es necesario conocer la columna estratigráfica, con la cual se determina la contribución al hundimiento de cada Unidad Geológica drenada. La distribución de los materiales geológicos y su posición en la columna estratigráfica son fundamentales para este paso.

Por otro lado, se requiere conocer la posición de la superficie piezométrica actual y, por lo menos una anterior; determinando su evolución, el número de estratos envuelto y el tipo de material geológico contenido en el intervalo drenado por bombeo de pozos profundos. De las mediciones de campo realizadas y con la información existente se integró este capítulo.

### **2.1 Columna Geológica y su relación con la Mecánica de Suelos.**

El Valle de Querétaro corresponde a una fosa o graben de forma cuadrangular alineada NNW-SSE, está situada en el límite oriente de la Subprovincia Fisiográfica de la Depresión del Bajío y relacionada al Fracturamiento San Miguel de Allende-Taxco, Ramal Querétaro. Fue rellenada por sedimentos lacustres, aluviones, vulcanitas, tobas y lavas.

Los diferentes materiales geológicos fueron clasificados de manera informal como Unidades Geológicas por Salas C. J. L., Alvarez Manilla A., A. y Fernández H. F. en 1989 y 1992. En la figura 2.1 se muestra la distribución de los materiales geológicos y las cinco fallas tectónicas inactivas que limitan la "Fosa Querétaro".

La sección geológica de la figura 2.2 fue conformada con los cortes litológicos de pozos profundos que se orientan de oeste a este (figura 2.1); la topografía del basamento está definida por la profundidad al primer estrato de basalto de la "Unidad Menchaca (Tmbm)". El cuadro 2.1 presenta las características de permeabilidad de cada estrato y sus relaciones con la columna geotécnica.

A pesar de que las deformaciones y distorsiones de estructuras aparecen en el espesor geotécnico, las capas profundas contribuyen al fenómeno de hundimiento, generación de grietas y crecimiento de fallas debido a la declinación del nivel estático; esto es: a la disminución de la presión de poro.

Las Unidades Geológicas Cuesta China (Tstcc) y Mompaní (Titm) son compresibles por disminución de la presión de poro ( $u$ ). Para su estudio desde el punto de vista geohidrológico se consideran como materiales granulares.

Las hendeduras del basalto de la Unidad Geológica Menchaca (Tmbm) se comprimen al disminuir la presión de poro por la gran cantidad de juntas.



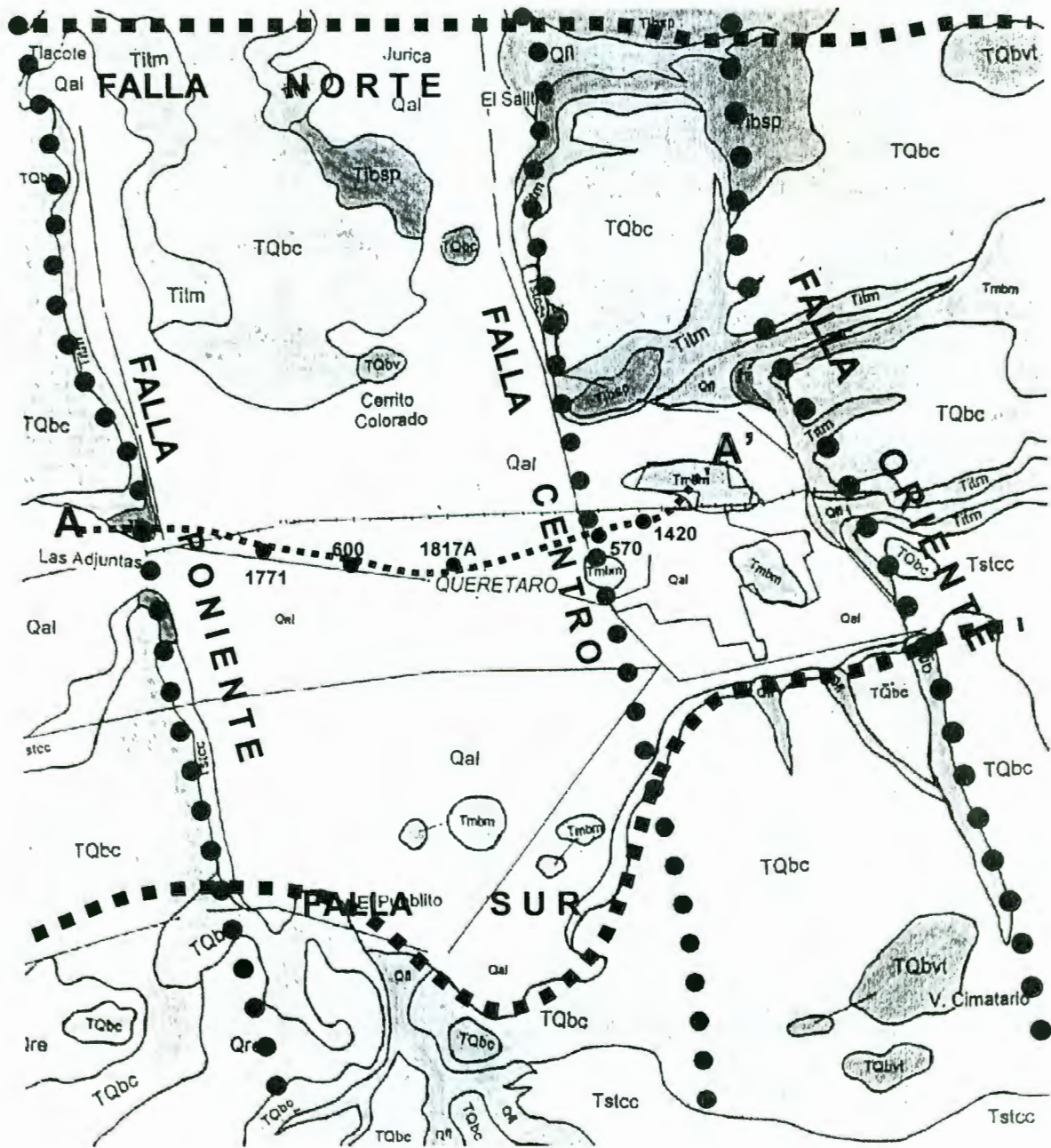


Figura 2.1 Mapa geológico general, Unidades Geológicas: Depósitos lacustres (Qal), basalto Unidad Cimatario (TQbc); ignimbritas riolíticas Unidad Hércules (Tstth); tobas de caída libre Unidad Cuesta China (Tstcc); basalto Unidad Menchaca (Tmbm); tobas Unidad Mompaní (Titm); basalto y andesita Unidad San Pedrito (Tibsp); intrusivos Unidad Juriquilla (Tij).

## Sección Geológica Oeste-Este, "Las Adjuntas-San Gregorio"

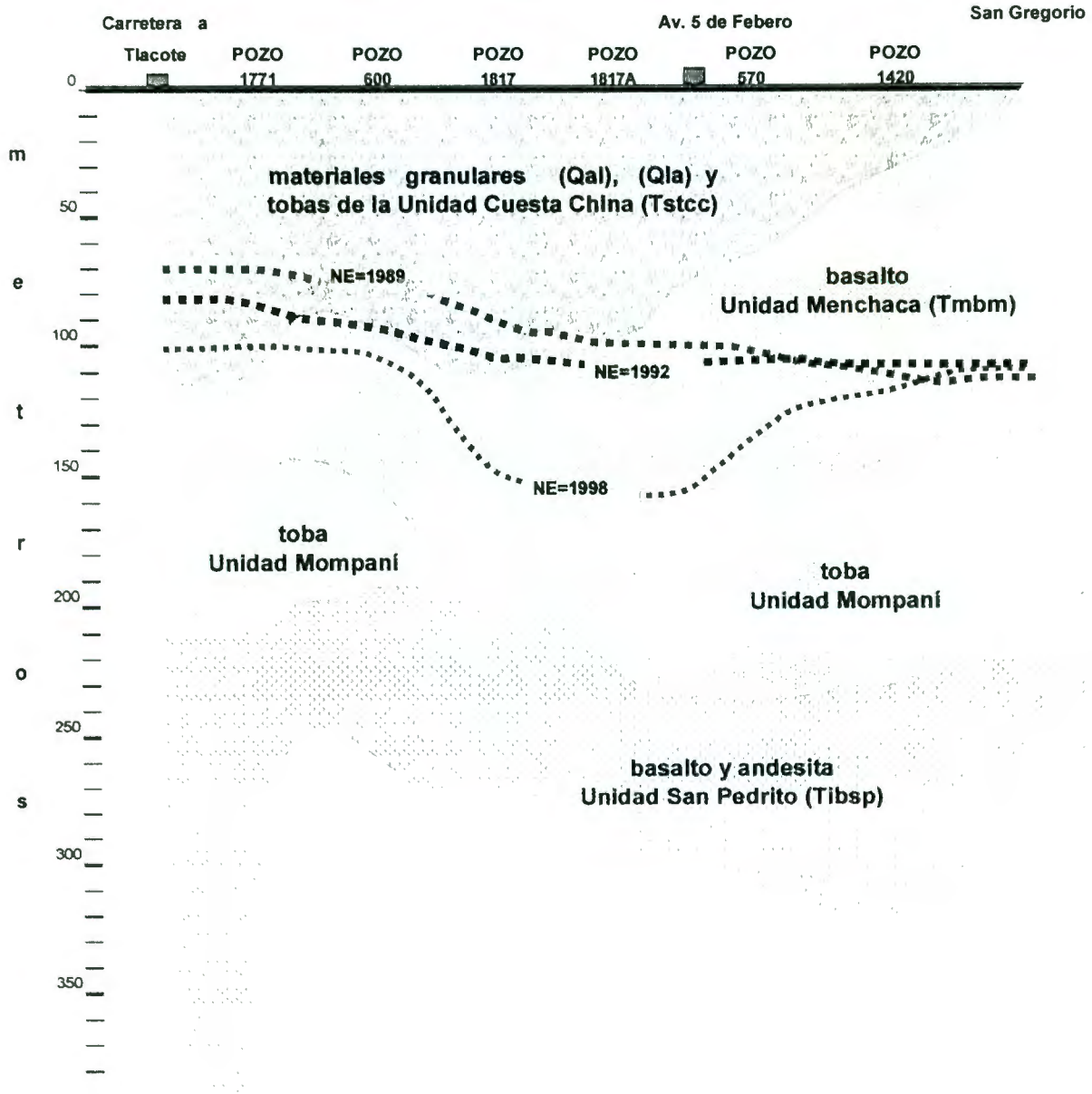


Figura 2.2 Sección Geológica Oeste-Este, "Las Adjuntas-San Gregorio". Se distingue el contacto entre los materiales granulares y el basamento geotécnico (basalto de la Unidad Menchaca (Tmbm)), así como la elevación de la superficie piezométrica para los años 1989, 1992 y 1998. Con ello se puede calcular el incremento del esfuerzo efectivo  $\sigma'$ .

De manera general, las deformaciones pueden considerarse viscoplásticas en las Unidades: Lacustre (Qla), Cuesta China (Tstcc) y Mompaní (Titm) debido al flujo transitorio. Por las características de permeabilidad y rigidez de los basaltos de la Unidad Menchaca (Tmbm), la deformación es del tipo elástico.

Cuadro 2.1. Relación entre las columnas geológica y geotécnica.

Unidad Geológica	Características Hidráulicas	Clasificación SUCS	Comportamiento Mecánico
Depósitos Lacustres (Qla)	Muy baja permeabilidad	CH, CL MH, ML	Compresibles por abatimiento de la superficie piezométrica
Clastos continentales (Qal)	Alta permeabilidad	SP, SW, GW, GP	
Toba Cuesta China (Tstcc)	Alta permeabilidad	SP, ML	Compresible por disminución de la presión de poro "u"
Basalto Menchaca (Tmbm)	Baja permeabilidad	Roca	Compresible por disminución de la presión de poro "u"
Tobas Mompaní (Titm) Miembros lítico, Arcilloso y arenoso	Permeabilidad media	SP-SM, SC-SM	Compresible por disminución de presión de poro "u" en el intervalo drenado

## 2.2 Geología del subsuelo (registros geofísicos y cortes litológicos de pozos).

Con objeto de conocer las características hidráulicas de las Unidades Geológicas en el subsuelo de la Zona Industrial Benito Juárez, se llevó a cabo en el año de 1989 una perforación a 750 metros financiada por la Empresa Celanese Mexicana, SA, determinando y correlacionando la columna geológica que aparece en la figura 2.3.

Con la integración de la información entre el registro eléctrico del pozo, corte litológico, prueba de productividad de cada estrato y la corroboración de la posición estratigráfica de cada Unidad dentro de la columna geológica, se definió que el basamento geohidrológico y geológico es el basalto y andesita de la Unidad San Pedrito (Tibsp).

Todos los materiales geológicos que descansan sobre el basamento geohidrológico son compresibles, tanto los granulares (aluviones, lacustres y tobas). Por otra parte el basalto fracturado es susceptible de sufrir acomodos importantes.

Entre los materiales granulares se encuentran los depósitos fluviales (Qfl) y lacustres (Qla) del Reciente; diferentes cuerpos de tobas arenosas (pómez), líticas y vítreas todas empacadas en limo y arcilla de la Unidad Cuesta China (Tstcc); los miembros lítico, arcilloso y arenoso de la toba Mompaní (Titm), correspondientes al Terciario Superior e Inferior respectivamente.

En el Terciario Medio aparece un basalto intensamente fracturado denominado Unidad Menchaca (Tmbm). Los acuíferos alojados en él son ocasionales, como lo son los pozos no productores perforados en esta Unidad.

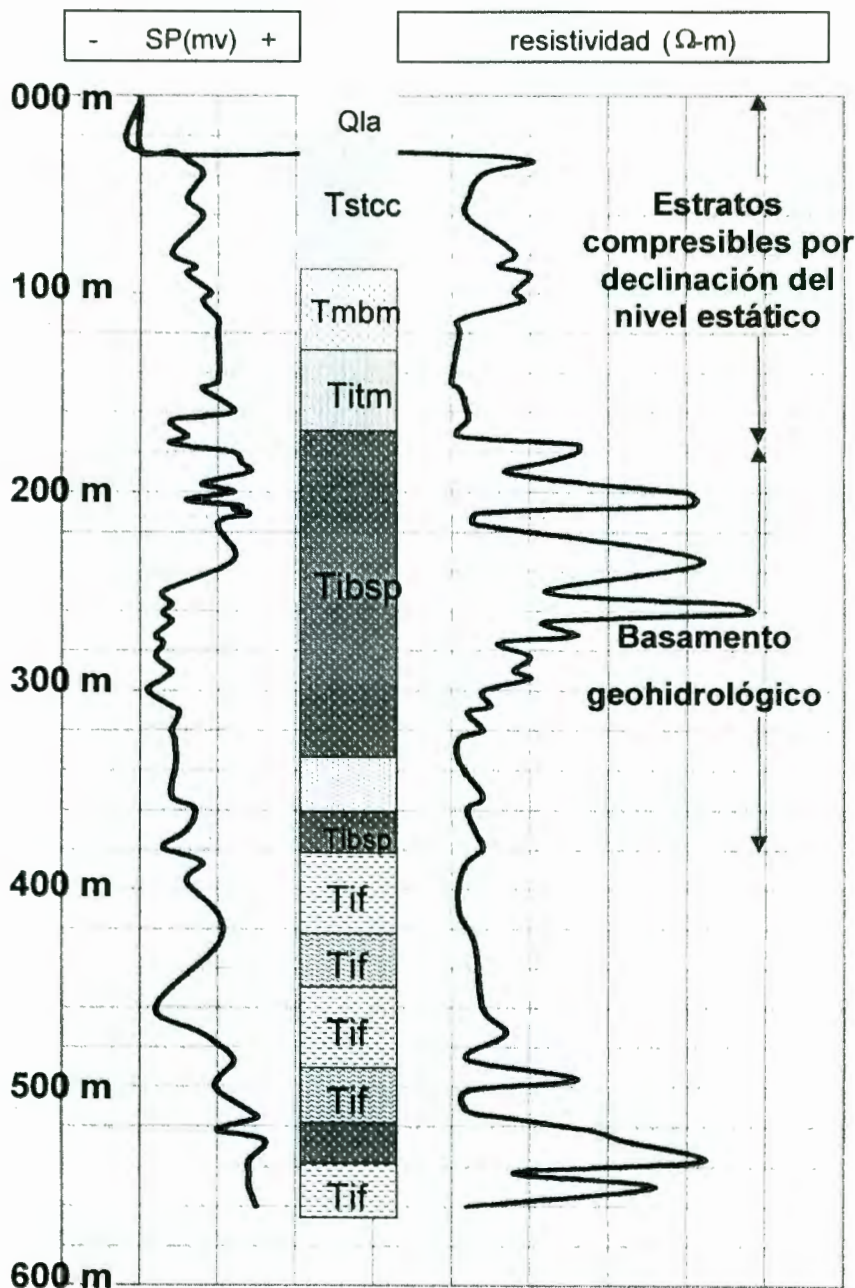


Figura 2.3 Columna geológica, estratos compresibles y basamento geohidrológico Pozo 1, Celanese Mexicana, Zona Industrial Benito Juárez.

Esta situación permite reconocer la gran variabilidad de la permeabilidad en el basalto Menchaca. Las ondículas del registro eléctrico en los carriles del potencial natural (SP, mv) y de la resistividad ( $\Omega$ -m) permiten demarcar las zonas de contacto claramente.

En la región nordeste de la Zona Industrial Benito Juárez los estratos compresibles arriba del basamento geotécnico alcanzan un espesor de casi 200 metros, determinados desde superficie hasta el plano de contacto entre las Unidades Mompaní (Titm) y San Pedrito (Tibsp).

El máximo espesor cortado para el basamento geohidrológico, basalto San Pedrito (Tibsp), es de 350 metros; por debajo de él, aparecen la Unidad de Fanglomerados (Tif) correlacionables con los conglomerados de la Formación El Morro o Rojo de Guanajuato, impermeables.

### 2.2.1 Zonificación Geohidrológica del Valle de Querétaro.

Una de las causas principales de la generación de grietas de tensión es la pérdida de la presión de poro ( $u$ ) debido a que la extracción por bombeo excede a la recarga. Esta última se da en zonas bien localizadas que presentan continuidad tanto vertical como horizontal.

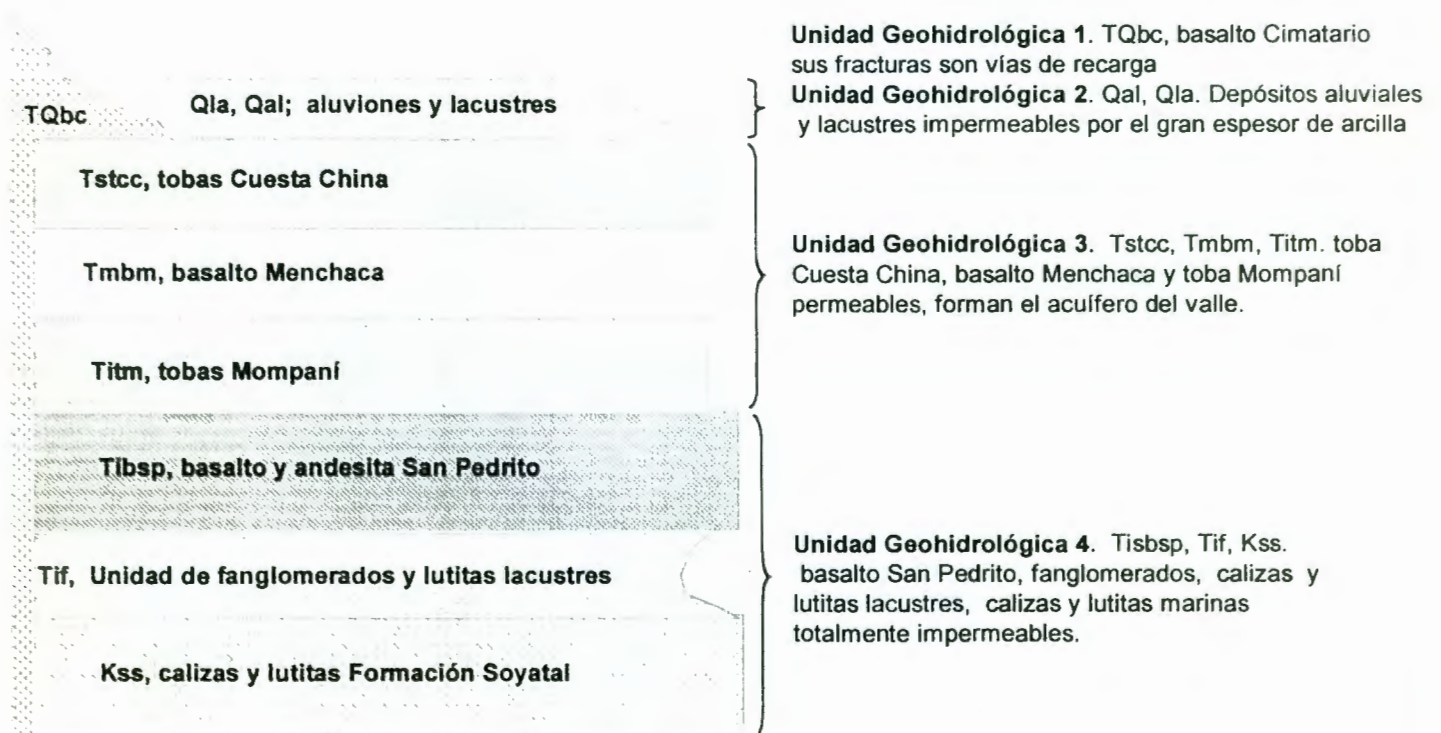


Figura 2.4. Columna estratigráfica y las unidades geohidrológicas.

El desarrollo de las fallas tectónicas que dieron origen al Valle y Zona Metropolitana de Querétaro se erige como una de las principales acotaciones para la recarga natural del acuífero, por ello se hace necesario presentar la Zonificación Geohidrológica.

La gran cantidad de pozos de agua perforados y sus variadas profundidades han permitido distinguir desde el punto de vista hidráulica, las Unidades Geohidrológicas como aquellos espesores de rocas que tienen un mismo comportamiento hidráulico, y como "Zonas Geohidrológicas" aquellas extensiones que forman ya sea, una zona de recarga o no.

En la figura 2.4 se muestra la columna estratigráfica con sus Unidades Geológicas y las principales Unidades Geohidrológicas definidas.

El mapa de la "Zonificación Geohidrológica del Valle de Querétaro" aparece en la figura 2.5: fueron definidas cuatro zonas geohidrológicas, estas son:

**Zona Geohidrológica I:** Es de permeabilidad buena a alta y constituye una zona de recarga. Comprende las Unidades Geológicas de: basalto Cimatarío (TQbc) y tobas Cuesta China (Tstcc). Aparece al Norte en Cerrito Colorado, El Tambor, San Pablo, vertientes N y NW del volcán El Cimatarío, Los Olvera y La Negreta.

**Zona Geohidrológica II:** Es muy poco permeable, aparece en los pilares de Menchaca, Bolaños, Pathé, Las Adjuntas, La Colmena y la parte alta de Huertas La Joya. Comprende las Unidades Geológicas de basaltos Menchaca (Tmbm); tobas Mompaní (Titm); basalto y andesita San Pedrito (Tibsp) y los cuerpos intrusivos de Juriquilla (Tij). El basalto Menchaca presenta fracturas por intemperismo pero conforme se adentra a la masa de la roca esta se torna masiva y sana, de ahí su impermeabilidad.

**Zona Geohidrológica III:** Le corresponde permeabilidad media a baja. Fue demarcada en las microfosas de Cuesta China, Pathé, Bolaños, Menchaca, El Salitre, Tángano, Juríca, Tlacote, Tejeda y cauce del Río Querétaro. Comprende materiales fluviales (Qfl) y miembros de las tobas Cuesta China (Tstch) y Mompaní (Titm), varios pisos están formados por basalto de la Unidad Menchaca (Tmbm) o San Pedrito (Tibsp).

**Zona Geohidrológica IV:** Abarca toda la parte plana y de pendientes suaves del Valle, está integrada por las arcillas montmorillonitas y lacustres. Es donde primeramente aparecen las grietas de tensión para posteriormente generar el crecimiento de fallas.

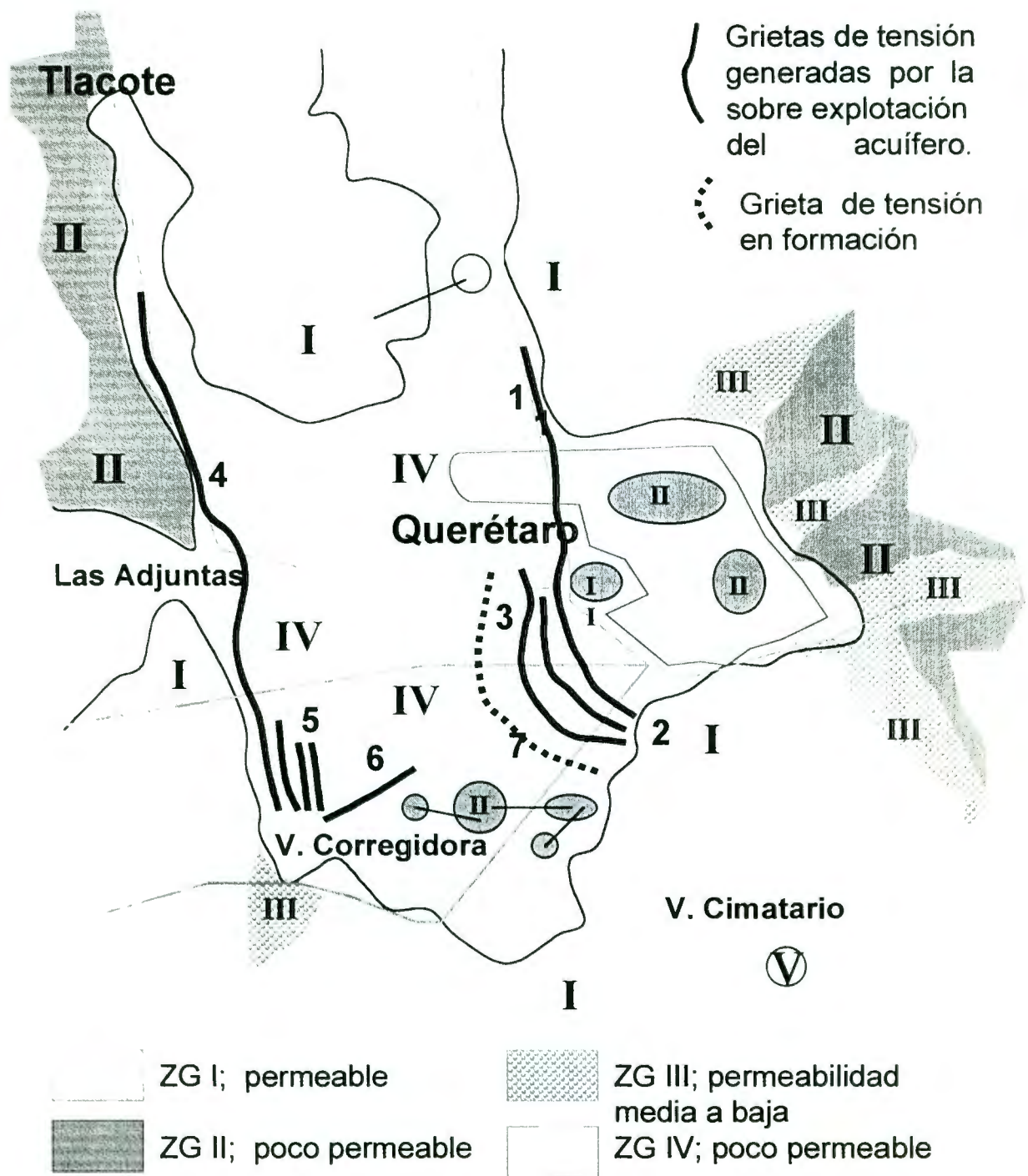


Figura 2.5 Plano de "Zonificación Geohidrológica" y localización de "Fallas Activas" de la Zona Metropolitana y Valle de Querétaro".

Como se puede apreciar en la figura 2.5, la superposición de las “Fallas Activas” definidas por Alvarez Manilla A. A., García B. J. y Fernández H. F. (1998); 1. “5 de Febrero”; 2. Jardines; 3, San Diego-La Carambada; 4. “Tlacote-Las Adjuntas-La Negreta”; 5. Sistema de Grietas San Pedro Mártir-La Carambada; 6. “Pirámide” y 7. “Grieta en Desarrollo” y de las tectónicas ubicadas en las Zonas Geohidrológicas I y III ocasiona que la recarga no se lleve a cabo, los estratos de trayectoria quedan muy por arriba del nivel del valle o se ponen en contacto Unidades Geohidrológicas de diferente permeabilidad.

El agua de precipitación pluvial solamente moja unos cuantos centímetros de las arcillas que conforman la Zona Geohidrológica IV, la mayor parte escurre, se evapora rápidamente o ambos sin poderse infiltrar prácticamente nada.

Como la extracción es mayor a la recarga, se genera el proceso de hundimiento, agrietamiento y crecimiento de fallas en la Zona Geohidrológica IV o Zona Geotécnica del Valle o Lago tal y como se muestra en la figura 1.4.

### **2.2.2 Elevación del Nivel Estático.**

Es necesario analizar la posición de la superficie piezométrica en períodos diferentes para caracterizar su evolución y el efecto que ocasiona en el campo de los esfuerzos efectivos. Cabe recordar que el flujo transitorio –comportamiento que tiene el acuífero del valle a lo largo del tiempo- ocasiona la deformación del esqueleto del suelo, acentuándolo en las zonas con grandes cambios en el almacenamiento ( $\Delta S$ ).

Las configuraciones de las figuras 2.6 y 2.7 corresponden a la posición de la elevación del nivel estático en los años 1989 y 1998, en ellas se aprecia el crecimiento del cono de abatimiento tanto en su extensión horizontal como a profundidad, drenando completamente el agua de los estratos compresibles.

#### **Elevación del Nivel Estático para Diciembre de 1989.**

La figura 2.6 presenta la configuración de la elevación del nivel estático para el mes de diciembre de 1989 realizada con la información de 37 pozos piloto. La concentración principal de pozos se da en la Zona Industrial Benito Juárez (ZIBJ) en una franja paralela a la Avenida 5 de Febrero.

De la configuración se aprecia que la equipotencial más profunda tiene la cota 1700 msnm. Este cierre corresponde al cono de abatimiento formado por una sobreexplotación del acuífero.



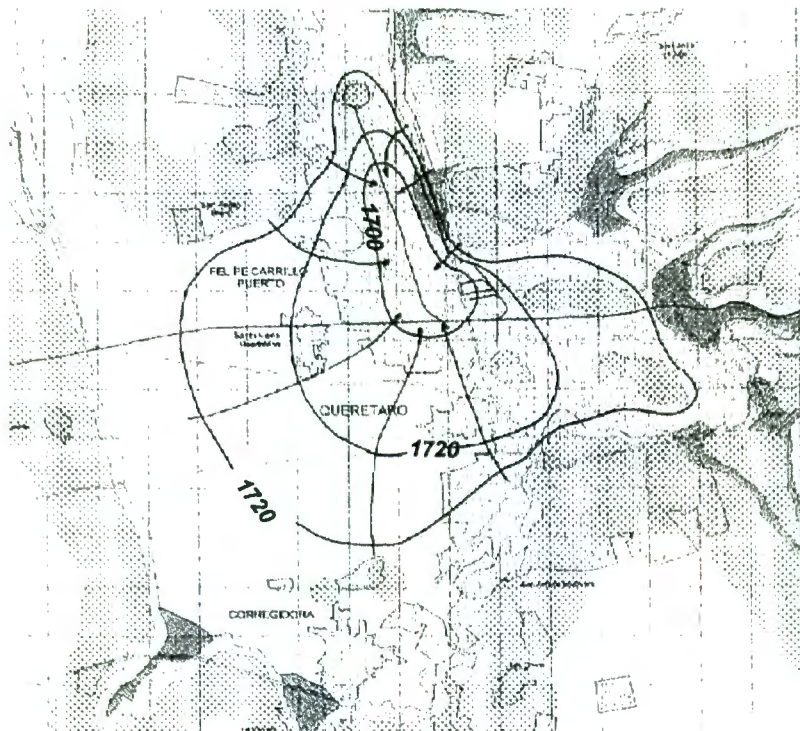


Figura 2.6. Elevación del Nivel Estático, Diciembre de 1989; equipotenciales en metros.

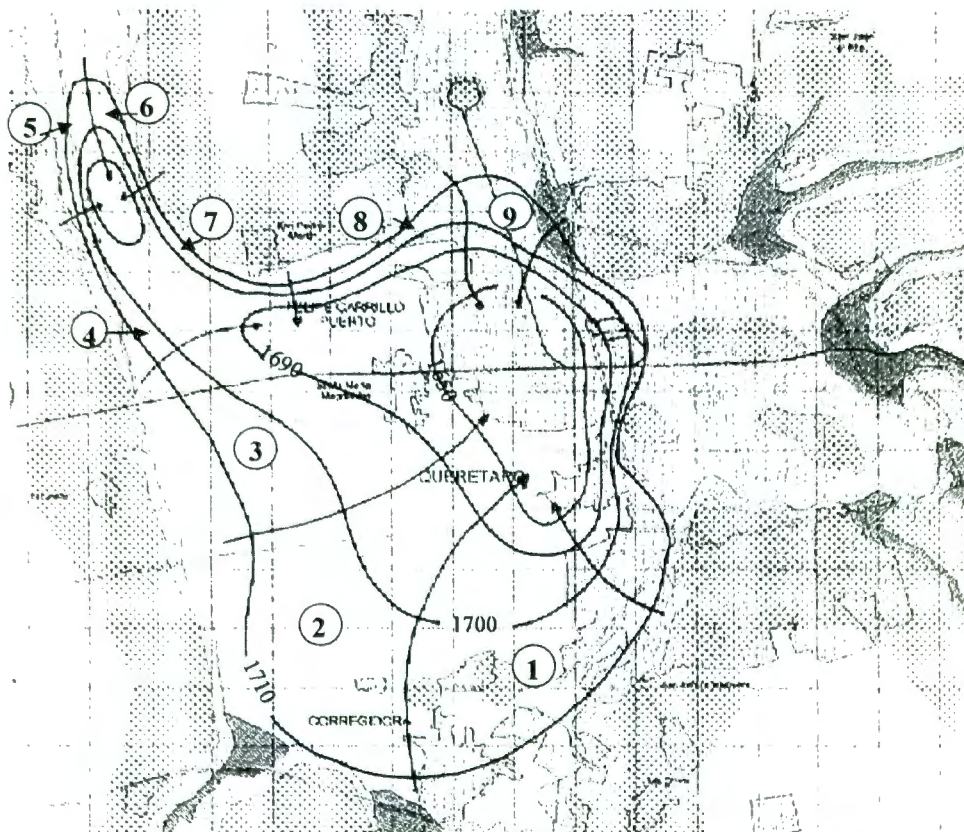


Figura 2.7. Elevación del Nivel Estático para Noviembre de 1998; cotas en metros. Los números en círculo corresponden a las nueve celdas de balance.

La equipotencial 1730 msnm marca la región donde la superficie piezométrica presenta una pendiente suave y por tanto una menor velocidad de flujo, si se considera que la cota topográfica de la superficie del terreno es la 1800 msnm, se deduce que la profundidad del nivel estático es de 70 metros, la más profundo corresponde a 103 metros en la ZIBJ.

Las flechas denotan la dirección del flujo, las equipotenciales discontinuas en la Zona Metropolitana de Querétaro significa que está inferida, puesto que solo se contó con algunos datos de pozos.

### **Elevación del Nivel Estático para Noviembre de 1998.**

Con las mediciones realizadas de profundidad al nivel estático en los pozos piloto durante los meses de Octubre y Noviembre se formó la configuración de elevación al nivel estático, Noviembre de 1998 presente en la figura 2.7.

La equipotencial de 1710 msnm aparece desde la vecindad de Tlacote, Balbanera y toda la zona paralela a la Avenida 5 de Febrero.

En este caso se forman dos “conoides” de abatimiento, uno de ellos en la ZIBJ paralelo a la Avenida 5 de Febrero, está definido por la equipotencial 1650 msnm y un área de influencia de 6 km<sup>2</sup>, el segundo se gesta en la zona de los Ranchos El Retablo y El Rincón, el área es de 1 km<sup>2</sup>.

Las flechas indican la dirección de flujo de agua, las bandas con gradientes hidráulicos tendidos aparecen paralelos a la Avenida 5 de Febrero y carretera de acceso a Tlacote. Las zonas sombreadas corresponden a las celdas de balance donde fue evaluada la disponibilidad del agua subterránea.

### **Balance del agua subterránea preliminar en Diciembre de 1998.**

La ecuación de la conservación de masa aplicada a un sistema acuífero se le denomina: Ecuación de Balance de Aguas Subterráneas y se expresa como:

$$\Sigma E - \Sigma S = \Delta V$$

Donde  $\Sigma E$  son las entradas al sistema acuífero;  $\Sigma S$  son las salidas y  $\Delta V$  corresponde al cambio de almacenamiento.

Las entradas son mediante flujo subterráneo ( $E_s$ ), respecto a la recarga vertical ( $R_v$ ) no figuran ni la precipitación pluvial ni el retorno por láminas de riego debido a los potentes espesores de arcilla.

Las salidas suceden de diferentes maneras: por flujo subterráneo (Ss), como manantiales (D), por evapotranspiración (Ev) y por bombeo de pozos (Ex).

Desde el punto vista geotécnico el valor del cambio del almacenamiento " $\Delta V$ " es muy importante; si el valor es positivo se puede considerar al acuífero subexplotado, si es cercano al valor de "0" el acuífero está en equilibrio, pero si es negativo su implicación es grave.

El valor negativo advierte un acuífero sobreexplotado, con una extracción mucho mayor a la recarga y que en el área de balance (en el volumen drenado) se llevan a cabo deformaciones manifiestas como: hundimiento, agrietamiento y crecimiento de fallas.

A la vez, el cambio de almacenamiento negativo revela que el volumen de espacios porosos que estuvieron ocupados por agua (incompresible), ahora los ocupa el aire (compresible), pudiendo estimar la magnitud del hundimiento y la zona de aparición de las grietas de tensión y crecimiento de fallas.

En la que Q es el caudal, T es la transmisibilidad de la formación acuífera definida como la cantidad de flujo de agua en una faja vertical de un acuífero de 1 m de ancho y que se extiende a través de todo el espesor saturado B al aplicar un gradiente hidráulico unitario e "i" corresponde al gradiente hidráulico; T fue tomada de las pruebas de bombeo de pozos cercanos o inmersos en la celda de balance; tanto la Secretaría de Desarrollo Urbano, Obras Públicas y Ecología Municipal como la Comisión Nacional del Agua contribuyeron con información. El cuadro 2.2 muestra los datos de las nueve celdas de balance que aparecen en la figura 2.7:

Cuadro 2.2. Celdas de balance y resultado del cambio de almacenamiento.

Celda No.	T (m <sup>2</sup> /seg) m <sup>2</sup> /seg	B (metros) metros	i ( % ) %	Q (m <sup>3</sup> /seg) m <sup>3</sup> /seg	Volumen anual *10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año
1	0.0050	3500	0.60	0.100	3.15
2	0.0040	3750	0.40	0.060	1.89
3	0.0050	3500	1.00	0.175	5.52
4	0.0045	3000	5.00	0.675	21.28
5	0.0025	1500	5.00	0.188	5.91
6	0.0027	1500	6.70	0.270	8.51
7	0.0025	3000	13.30	1.000	31.53
8	0.0015	3000	8.30	0.375	11.82
9	0.0100	1500	1.50	0.231	7.28
<b>Entradas subterráneas:</b>				$\Sigma E(\text{Mm}^3) =$	<b>96.9</b>
<b>Extracción en pozos:</b>				$\Sigma S(\text{Mm}^3) =$	<b>121.5</b>
<b>Cambio de almacenamiento negativo:</b>				$\Sigma E - \Sigma S = \Delta V (\text{Mm}^3/\text{año}) =$	<b>-24.6</b>

La ecuación de balance de aguas subterráneas para el sistema acuífero del Valle de Querétaro queda de la siguiente manera:

$$E_s - S_s - E_x = +/- \Delta V$$

Para llevar a cabo el balance de agua subterránea se trazan celdas de balance como las presentadas en la figura 2.7 el cálculo del caudal que pasa por cada una de ellas, dado por la expresión siguiente:

$$Q = T B i$$

De la aplicación de la ecuación de la conservación de masa se tiene un almacenamiento negativo para Diciembre de 1998 equivalente a  $-24.57 \text{ Mm}^3$ .

### 2.2.3 Evolución y Cambio de Almacenamiento Negativo, su relación con el Campo de Esfuerzo Efectivo " $\sigma'$ ".

El esfuerzo impuesto al suelo, ya sea por peso propio o por cargas externas es de vital importancia para la ingeniería geotécnica. Cuando una masa de suelo está sujeta a un incremento de esfuerzo efectivo, cambia tanto en forma como en volumen.

Los cambios en el esfuerzo efectivo son significativos para suelos cohesivos y menos marcados en los friccionantes. Terzaghi introdujo el concepto de esfuerzo efectivo estableciendo que la compresión, distorsión y cambios en la resistencia al esfuerzo cortante están normados por el "esfuerzo efectivo".

Conocer la variación en la distribución del esfuerzo efectivo a lo largo de una sección y una columna estratigráfica establecida, permite definir las zonas que sufrirán deformaciones y causarán distorsiones a las superestructuras e infraestructura. El esfuerzo total  $\sigma$  dentro de una masa de suelo en cualquier punto por debajo del nivel estático se divide en dos partes:

**Esfuerzo neutro o de poro ( $u$ ):** es el que soporta el agua contenida en los espacios vacíos de los materiales granulares. Actúa con la misma intensidad en todas las direcciones, o

**Esfuerzo Efectivo ( $\sigma'$ ):** Es el esfuerzo que soporta el esqueleto del suelo o de las rocas. Se le conoce también como esfuerzo intergranular.

Los sólidos del suelo son relativamente incompresibles y soportan los esfuerzos cortantes; el agua es incompresible pero ofrece un comportamiento viscoso (dependiente del tiempo) con respecto de la resistencia al esfuerzo cortante ( $\tau$ ), finalmente, los gases son compresibles y no ofrecen resistencia alguna al esfuerzo cortante.

El esfuerzo efectivo en una masa de suelo controla su cambio de volumen y resistencia. Magnitudes grandes del esfuerzo efectivo inducirán al suelo a un estado más denso y compacto, incrementado a la vez, la resistencia al esfuerzo cortante.

### Evolución del Nivel Estático, período 1989-1998.

En la figura 2.8 se aprecia la disposición en planta del cono de abatimiento generado por la profundización de la superficie piezométrica debido a la sobre explotación del acuífero en el período 1989-1998.

En las regiones de Felipe Carrillo Puerto y Zona Industrial Benito Juárez el nivel estático se abatió 80 metros, mientras que en la zona de El Retablo y El Rincón la evolución negativa fue de 30 metros. Para los pozos de una empresa de lácteos el abatimiento fue de 110 metros.

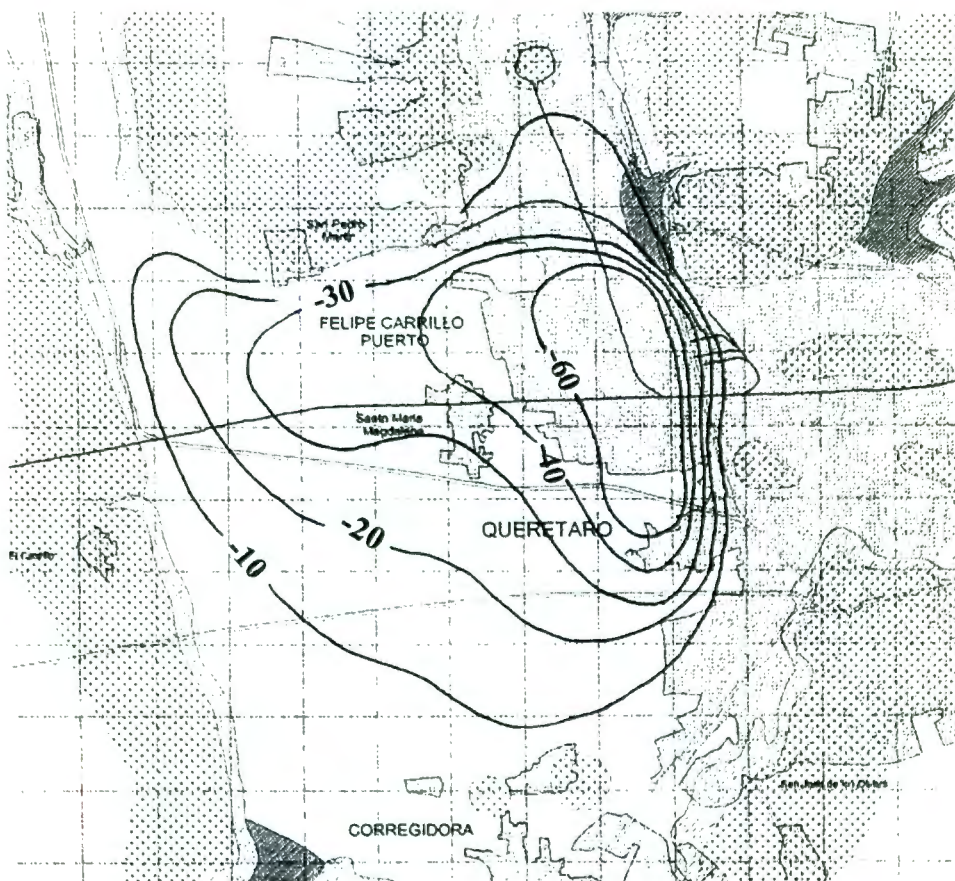


Figura 2.8. Evolución del Nivel Estático para el período comprendido entre Diciembre de 1989 a Noviembre de 1998.

La figura 2.2 muestra los cortes litológicos y posición de la superficie piezométrica para los años 1989, 1992 y 1998 en los pozos marcados por la Comisión Nacional del Agua como: 1771, 600, 1817A, 570 y 1420.

La evolución negativa promedio para el período Diciembre de 1989 a Noviembre de 1998, en la zona de mayor explotación equivale a un promedio de **7.6 m/año** en nueve años. Las expresiones para el esfuerzo efectivo y la resistencia al esfuerzo cortante están dadas como:

$$\sigma' = \sigma - u; \quad \tau = c + \sigma' \tan \phi \quad \text{ó} \quad \tau = c + (\sigma - u) \tan \phi$$

Siendo  $\sigma$  el esfuerzo total, “c” corresponde a la cohesión de los materiales arcillosos y limosos. “ $\phi$ ” es el ángulo de fricción interna de las arenas, gravas y brechas. El “principio del esfuerzo efectivo” permanece bajo las condiciones hidrostática e hidrodinámica, por lo que la presión de poro neutra de manera general puede ser expresada como:

$$u = u_h + u_e$$

$u_h$  es la presión de poro hidrostática y  $u_e$  es el exceso de la presión de poro debido a la condición hidrodinámica resultante del flujo de agua subterránea. La expresión de  $u$  es muy importante en la solución de problemas relacionados al hundimiento y flujo de agua subterránea.

El pozo 1817A ubicado en la zona de la Ex Hacienda La Capilla, presenta los cambios del esfuerzo efectivo según la declinación de la superficie piezométrica en los años 1989 y 1998, cuadro 2.3, el incremento del esfuerzo efectivo fue de 60 t/m<sup>2</sup> lo que puede ocasionar ruptura de granos (Gómez L. J. A., 1996).

Cuadro 2.3. Datos del esfuerzo total  $\sigma$  (t/m<sup>2</sup>), presión de poro  $u$  (t/m<sup>2</sup>) y esfuerzo efectivo  $\sigma'$  (t/m<sup>2</sup>) para el pozo 1817a en función del corte litológico y posición del nivel estático en los años 1989 y 1998.

$\Delta h$	$h$	$\gamma_m$	$\sigma$	$\Sigma\sigma$	$\Delta h$	$\gamma_w$	$u$	$\Sigma\sigma$	$\sigma'(1989)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
14	14	2.04	28.56	28.56	14	0	0	0	28.56
76	90	1.79	136.04	164.6	76	0	0	0	164.60
10	100	2.04	20.4	185	10	1	10	10	175.00
3	103	2.85	8.55	193.55	3	1	3	13	180.55
50	153	2.85	142.5	336.05	50	1	50	63	273.05
17	170	2.85	48.45	384.5	17	1	17	80	304.50

$\Delta h$	$h$	$\gamma_m$	$\sigma$	$\Sigma\sigma$	$\Delta h$	$\gamma_w$	$u$	$\Sigma\sigma$	$\sigma'(1998)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
14	14	2.04	28.56	28.56	14	0	0	0	28.56
76	90	1.79	136.04	164.6	76	0	0	0	164.60
10	100	2.04	20.4	185	10	0	0	0	185.00
3	103	2.85	8.55	193.55	3	0	0	0	193.55
50	153	2.85	142.5	336.05	50	0	0	0	336.05
17	170	2.85	48.45	384.5	17	1	17	17	367.50

La figura 2.9 muestra el corte litológico y los diagramas de esfuerzo efectivo. Los primeros 110 metros corresponden a suelos arenolimosos, los cuales contenían al nivel estático en 1989, de 110 metros a 180 metros de profundidad se cortó basalto de la Unidad Menchaca (Tmbm), el nivel estático descendió 63 en nueve años por lo que el esfuerzo efectivo incrementó  $63 \text{ t/m}^2$  tal y como lo muestra la zona sombreada del perfil.

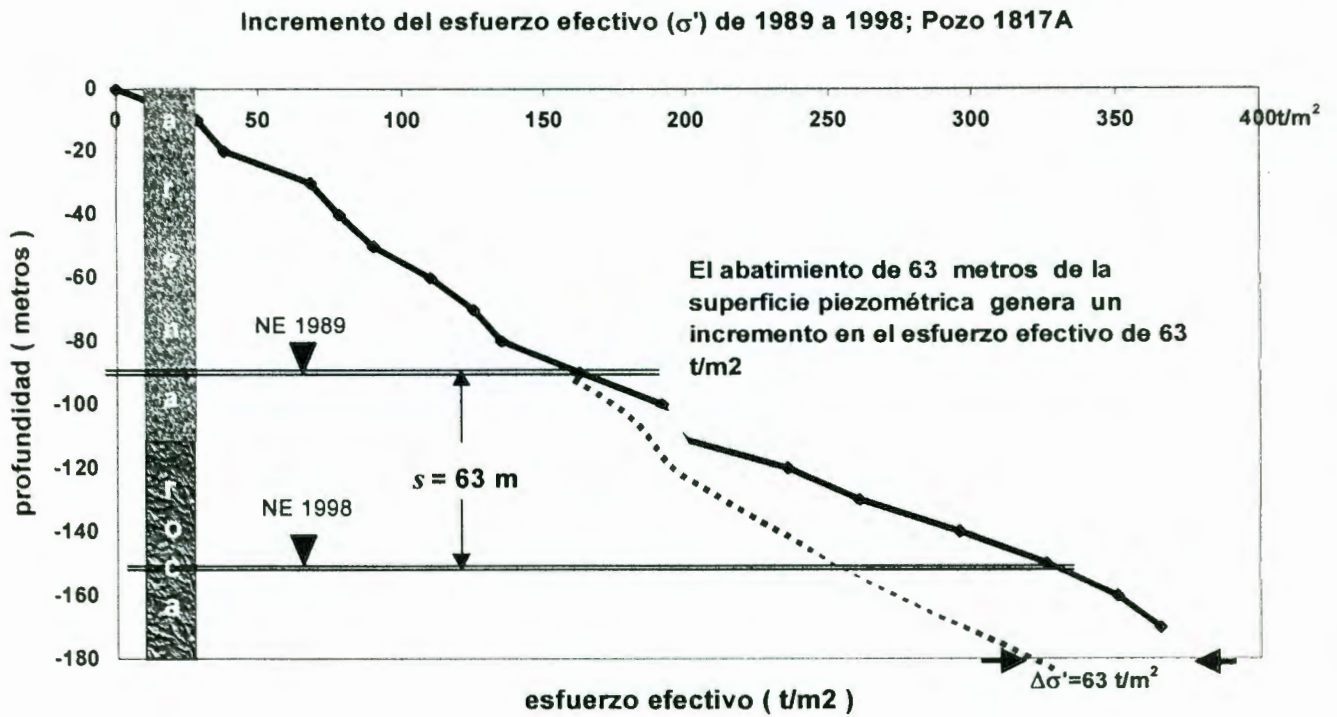


Figura 2.9. Corte litológico, posición de la superficie piezométrica y diagrama del esfuerzo efectivo del Pozo 1817A.

### CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE COMPRESIBILIDAD, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Los materiales que forman el subsuelo se asocian a un sistema de tres fases: los granos de suelo y líticos constitutivos de la matriz; el agua y gas son las fases que de manera indistinta saturan los poros, fracturas o ambos.

Para el análisis de hundimiento, agrietamiento y crecimiento de fallas generado a partir de la declinación de la superficie piezométrica, es necesario conocer los parámetros involucrados como son: transmisibilidad ( $T$ ), coeficiente de almacenamiento ( $S$ ), relación de vacíos inicial ( $e$ ) y el coeficiente de compresibilidad ( $a^*_v$ ).

Los dos primeros se obtienen de las pruebas de bombeo, mientras que los últimos se cuantifican de ensayos de compresibilidad realizados en muestras inalteradas obtenidas del estrato compresible que es la Unidades Cuesta China (Tstcc).

Como el incremento del esfuerzo efectivo ha sido de casi  $63 \text{ t/m}^2$  en los últimos diez años en la Zona Industrial Benito Juárez, los ensayos fueron llevados hasta cargas extremas equivalentes a  $12 \text{ kg/cm}^2$  correspondiente al nivel del esfuerzo efectivo en el campo.

La determinación de los parámetros de relación de vacíos y coeficiente de compresibilidad en los depósitos lacustres no representa mayor problema, dado que las muestras son colectadas en pozos a cielo abierto hasta 6 metros de profundidad.

Las tobas de las Unidades Cuesta China (Tstcc) y Mompaní (Titm) así como el basalto de la Unidad Menchaca están a profundidades considerables en el Valle, el acceso es difícil y a costos muy altos; por esa razón, las muestras inalteradas fueron colectadas en lugares donde está expuesta la Unidad Geológica correspondiente, como son el acceso al Aeropuerto Internacional de Querétaro y Zona Industrial Benito Juárez.

Los ensayos de mecánica de suelos fueron realizados en el laboratorio de Geotécnia y Concreto, AC y en la División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Los parámetros determinados: Pesos específicos de la masa ( $\gamma_m$ ), de sólidos ( $\gamma_s$ ) y relativo de sólidos ( $S_s$ ); relación de vacíos inicial a diferentes cargas ( $e$ ), coeficiente de compresibilidad ( $a^*_v$ ) y grado de saturación ( $G_w$ ) se muestran en la figura 3.1.



### 3.1 Parámetros de compresibilidad para las tobas Cuesta China (Tstcc).

Una sobrecarga o incremento del peso propio del suelo por abatimiento del nivel estático ocasiona un decremento en el volumen debido a tres factores:

- Compresión de la materia sólida,
- Compresión del agua y aire dentro de los vacíos, y
- Drenaje del agua y aire de los vacíos.

La compresión del agua y sólidos del suelo se considera se prácticamente nula, solamente aparece la rotura de granos por carga excesiva.

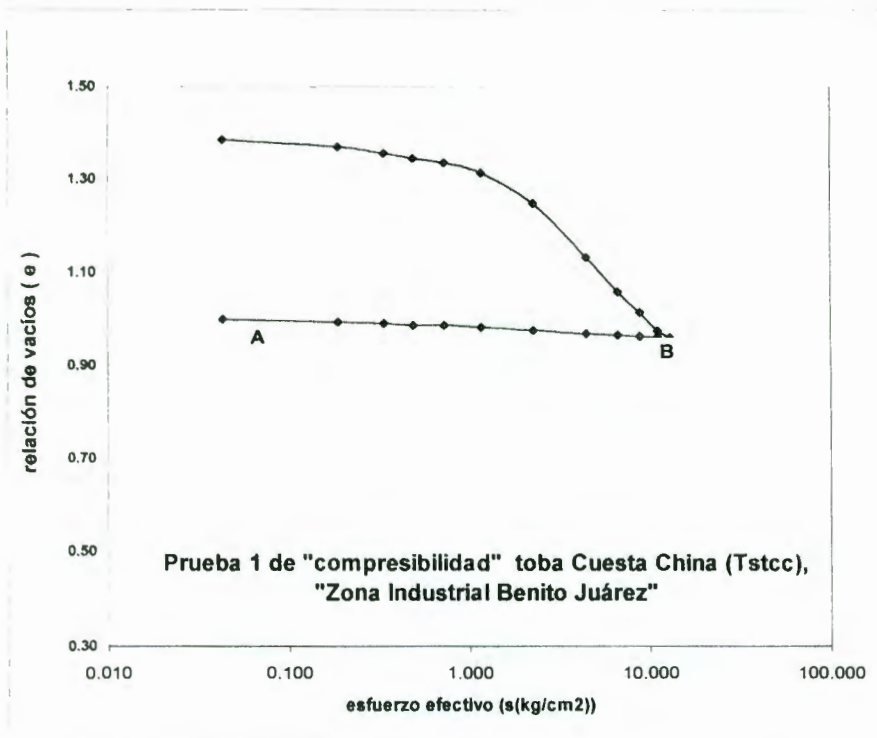
El ajuste gradual de la presión de poro y esfuerzo efectivo acoplados a la profundización de la superficie piezométrica por fenómenos transitorios como flujo hidrodinámico, ocasionan la consolidación.

El intervalo drenado en el período Diciembre de 1989 a Noviembre de 1998 fue de casi 100 metros en la región de la Zona Industrial Benito Juárez.

Como el intervalo drenado pasa a un estado de suelo parcialmente saturado y considerando que el esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) máximo equivalente fue de  $100 \text{ t/m}^2$ , se consideró realizar la prueba de "compresibilidad" en las condiciones a las que se encuentra el material geológico, cargando periódicamente hasta alcanzar  $10 \text{ kg/cm}^2$ , o más. Los datos interpretados, así como la curva compresibilidad se presentan en las figuras 3.1 y 3.2.

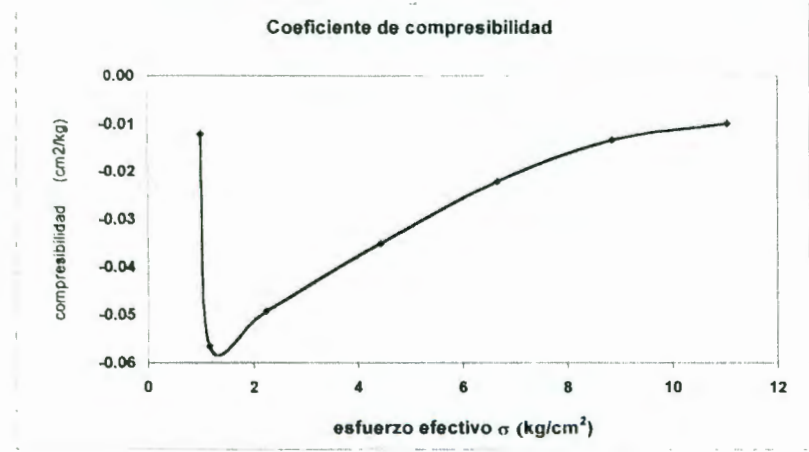
Estos valores son necesarios para cuantificar el hundimiento como se verá en el Capítulo 4.

Relaciones Estado Natural. Prueba 1 de "compresibilidad" toba Cuesta China (Tstcc)											
Wh	137.000	gr	Vt	91.402	cm <sup>3</sup>	γm	1498.873	kg/m <sup>3</sup>	w	38.280	%
Ws	99.074	gr	Vv	53.297	cm <sup>3</sup>	γs	1138.293	kg/m <sup>3</sup>	e	1.399	
Ww	37.926	gr	Vs	38.105	cm <sup>3</sup>	Ss	2.600		Gw	71.160	%



$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$e$
0.000	1.399
0.043	1.385
0.186	1.370
0.335	1.357
0.486	1.348
0.725	1.336
1.159	1.315
2.245	1.249
4.438	1.134
6.663	1.061
8.850	1.017
11.046	0.978
12.936	0.963
11.046	0.964
8.850	0.965
6.663	0.968
4.438	0.971
2.245	0.978
1.159	0.984
0.725	0.988
0.486	0.989
0.335	0.993
0.186	0.996
0.043	1.001

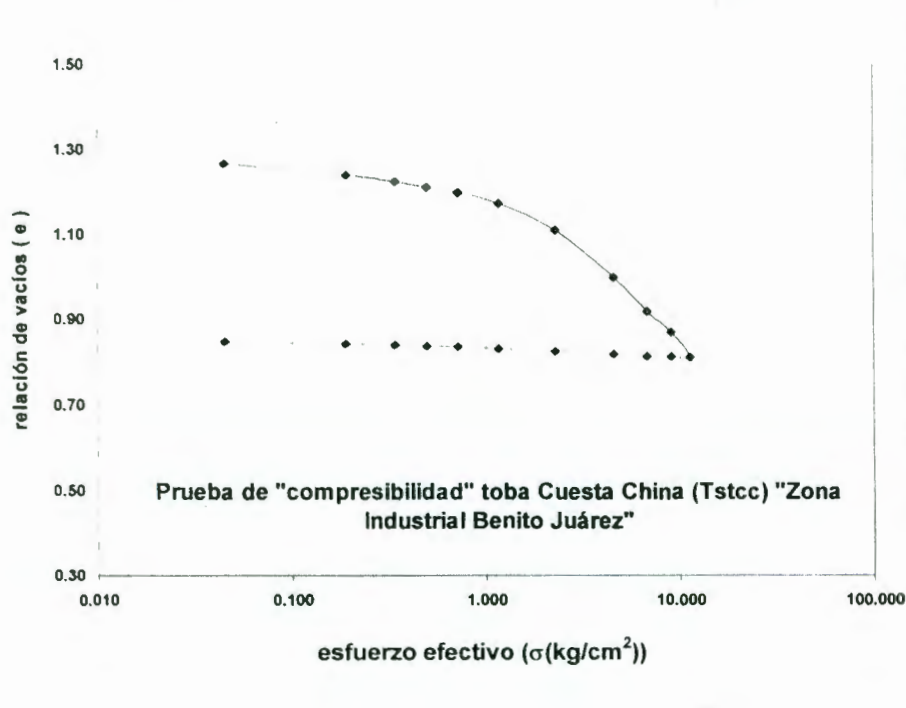
"compresibilidad" en el intervalo de "esfuerzos efectivos" de campo 1



$\Sigma q$	$e$	$\alpha v$
1.000	1.325	-0.0121
1.159	1.315	-0.0565
2.245	1.249	-0.0493
4.438	1.134	-0.0351
6.663	1.061	-0.0221
8.850	1.017	-0.0485
11.046	0.978	

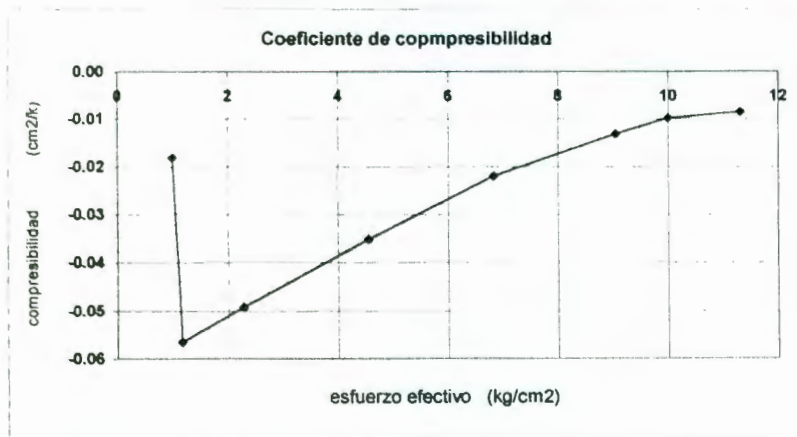
Figura 3.1. Curva de compresibilidad, y nivel de esfuerzos efectivos en campo para la toba de la Unidades Cuesta China (Tstcc); sus coeficientes de compresibilidad, Prueba 1.

Relaciones Estado Natural. Prueba 2 de "compresibilidad" toba Cuesta China (Tstcc)											
Wh	136.500	gr	Vt	87.819	cm <sup>3</sup>	γm	1554.333	kg/m <sup>3</sup>	w	36.550	%
Ws	99.963	gr	Vv	49.372	cm <sup>3</sup>	γs	1138.293	kg/m <sup>3</sup>	e	1.284	
Ww	36.537	gr	Vs	38.447	cm <sup>3</sup>	Ss	2.600		Gw	74.004	%



σ (kg/cm <sup>2</sup> )	e
0.000	1.284
0.045	1.267
0.190	1.240
0.340	1.225
0.496	1.213
0.719	1.201
1.165	1.175
2.280	1.112
4.554	1.000
6.831	0.920
9.051	0.871
11.319	0.812
9.051	0.813
6.831	0.815
4.554	0.819
2.280	0.825
1.165	0.832
0.719	0.836
0.496	0.838
0.340	0.841
0.190	0.843
0.045	0.848

"compresibilidad" en el intervalo de "esfuerzos efectivos" de campo 2



Σq	e	CV
1.000	1.178	-0.0182
1.165	1.175	-0.0565
2.280	1.112	-0.0493
4.554	1.000	-0.0351
6.831	0.920	-0.0221
9.051	0.871	-0.0485
10.000	0.825	-0.0099
11.319	0.812	-0.0085

Figura 3.2. Curva de compresibilidad, y nivel de esfuerzos efectivos en campo, toba de las Unidades Cuesta China (Tstcc); sus coeficientes de compresibilidad, Prueba 2.

## CAPÍTULO 4. MODELO COMPUTACIONAL DEL FENÓMENO ACOPLADO DE FLUJO-DEFORMACIÓN Y HUNDIMIENTO POR SOBRE-EXPLORACIÓN DEL ACUÍFERO PARA UN ESTRATO COMPRESIBLE.

Como se dijo anteriormente, un medio poroso o fracturado que forma un acuífero, yacimiento geotérmico o petrolero respectivamente, está sujeto a esfuerzos internos hidrostáticos ( $u$ ) debido al fluido que satura el medio, así como al esfuerzo externo ( $\sigma$ ) ejercido por la Unidad Geológica en la cual el volumen está inmerso.

En el inciso de balance de agua subterránea se determinó que desde el punto de vista geotécnico el valor del cambio del almacenamiento " $\Delta S$ " es muy importante, ya que si es negativo, implica que un cierto volumen fue drenado en lapso de tiempo dado, ocasionando la deformación por fenómenos transitorios de flujo, esto es: hundimiento, agrietamiento y crecimiento de fallas.

La magnitud del hundimiento es de acuerdo a la compresibilidad tanto de los sólidos como del agua, intervalo drenado y permeabilidad del medio.

La compresibilidad del agua ( $\beta$ ) es la medida de cambio de volumen cuando un medio está sujeto a variaciones en la presión normal o tensión, esto es:

$$\beta = - \frac{1}{V} \frac{dV}{du} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{du} \quad (2)$$

siendo " $V$ " el volumen de la masa de la sustancia, " $u$ " es la presión de poro, " $\rho$ " corresponde a la densidad y el signo negativo indica decremento del volumen conforme la presión crece.

La derivada de la ecuación 1 es material, lo que significa que  $\beta$  está definida con respecto a una masa constante.

Dado que el decremento de " $u$ " ocasiona un incremento de esfuerzos efectivos, se puede inferir que la porosidad ( $n$ ) y relación de vacíos ( $e$ ) cambiará, a continuación se presentan algunas relaciones útiles para el modelo de hundimiento:

$$n = \frac{V_v}{V_m} \quad (3)$$

donde " $V_v$ " es el volumen de vacíos y " $V_m$ " el volumen de la masa.

$$n = \frac{V_m - V_s}{V_m} \quad (4)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (5)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \quad (6)$$

De las relaciones gravimétricas:

$$V_v = nV_m \quad (7)$$

$$V_v = (1 - n)V_m \quad (8)$$

La compresibilidad ( $a^*_v$ ) de un medio poroso saturado esta definido como el cambio diferencial en el volumen de la masa respecto a la unidad de cambio en el esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ), Terzaghi (1925 y 1943), considerando  $u = \text{constante}$ .

$$a^*_v = \frac{1}{V_m} \frac{dV_m}{d\sigma'} \quad (9)$$

Los cambios en la porosidad resultan de las variaciones en el esfuerzo efectivo  $d\sigma'$ , condicionado por la carga total " $d\sigma$ " y la presión normal o de poro " $du$ ".

$$d\sigma' = d\sigma - du \quad (10)$$

Independiente a que  $u > 0$  o  $u < 0$  existe la compresión, cuando estas son extremas, los materiales geológicos muestran cambios irreversibles en la porosidad debido a la distorsión y ruptura de los granos de la matriz.

En la figura 3.1 se puede ver la variación entre  $e$  y  $\sigma$ , donde  $e = n/(1-n)$  y  $\sigma'$  es el esfuerzo efectivo intergranular; el esfuerzo y deformación son exclusivamente verticales.

El tramo AB de la figura 3.1 manifiesta que la recuperación es inelástica, pero el comportamiento de la matriz a grandes esfuerzos puede considerarse elástico (resiliencia).

Cuando actúan esfuerzos extremadamente altos, similares a los de los yacimientos petroleros o geotérmicos o aquellos que se producen en áreas extensas con declinación de la superficie piezométrica considerable, la pendiente de la recta se empina conforme los granos o líticos se rompen en los puntos de contacto.

No existe una manera analítica para relacionar al esfuerzo efectivo y la porosidad,  $n=n(\sigma)$ , pero para pequeños cambios del esfuerzo efectivo se puede definir el coeficiente de compresibilidad de la matriz a partir de la curva de la figura 3.1 como:

$$a_v = \frac{de}{d\sigma'} \quad (11)$$

En problemas acoplados de flujo a través de un medio poroso compresible existen “dos movimientos” simultáneos: el del fluido y el de la matriz sólida, ambos ocasionan la deformación.

Para establecer la ecuación que represente el problema acoplado de flujo-deformación es necesario realizar las siguientes consideraciones (Chen, Z. H., 1995):

- El fluido considerado es de una sola fase o bien, una mezcla homogénea,
- Si el fluido es compresible, la densidad depende solamente de la presión,
- No se considera dependencia de la densidad respecto a la concentración del soluto,
- Para obtener la ecuación constitutiva acoplada de flujo-deformación se hace uso del balance de masa,
- Las deformaciones volumétricas están normadas por el esfuerzo efectivo y no incluyen aquellas causadas por dilatación,
- La deformación de los suelos depende de la trayectoria de esfuerzos,
- Conforme aumenta el esfuerzo efectivo, el suelo se comporta elásticamente y las deformaciones plásticas desaparecen,
- El coeficiente de compresibilidad volumétrica es constante,
- La conductividad hidráulica es constante,
- La deformación no es isocórica, y
- Considerando el desarrollo mediante la forma euleriana, la identidad y cantidad de materia puede cambiar con el tiempo pero la forma del volumen de control se mantiene fijo.

#### 4.1 Ecuaciones de continuidad y conservación de la masa (fluido-sólido) de un medio poroso.

La ecuación de la conservación de la masa se obtiene considerando el volumen elemental representativo (VER), definido por el producto  $dx dy dz$  de la figura 4.1, las direcciones son ortogonales  $x, y, z$ ., el medio es heterogéneo con permeabilidad  $K_x, K_y$  y  $K_z$ . Se establece el vector de flujo de masa  $J = (J_x, J_y, J_z)$  por unidad de área, por unidad de tiempo.

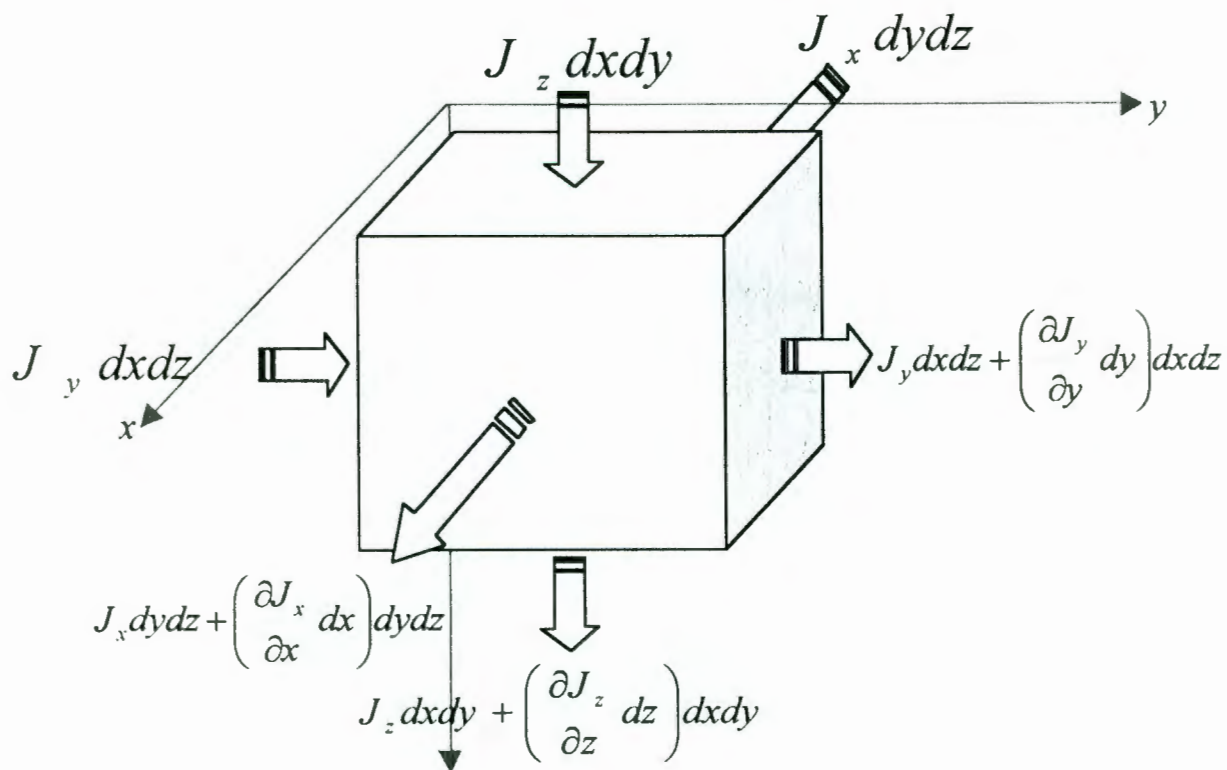


Figura 4.1. Volumen elemental representativo (VER) donde se establece de manera euleriana la ecuación constitutiva del proceso de flujo-deformación,

Dado que el estudio está enfocado al movimiento y deformación verticales, el análisis subsecuente se considerará al flujo únicamente en la dirección "z". El volumen que entra debe ser el mismo que sale, esto es:

$$J_z dx dy = J_z dx dy - \left( \frac{\partial J_z}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (12)$$

resultando:

$$-\frac{\partial J}{\partial z} = dx dy dz \quad (13)$$

En el flujo transitorio el medio adquiere propiedades de almacenamiento, por lo que la compresibilidad tanto de la formación acuífera como del fluido de saturación deben ser considerados; tomando en cuenta que en el volumen elemental representativo  $VER=dx dy dz$  el término 11 debe ser igual al cambio de almacenamiento para mantener el principio de la conservación de la masa:

$$-\frac{\partial (\rho n dx dy dz)}{\partial t} \quad (14)$$

Igualando 13 y 14, al simplificar términos queda:

$$\frac{\partial J}{\partial z} + \frac{\partial (\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

Al considerar las tres direcciones, queda como:

$$div J + \frac{\partial (\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

De las ecuaciones constitutivas, se tiene que  $J = \rho q = \rho n \mathbf{v}$ ;  $q$  es la descarga específica,  $\mathbf{v}$  corresponde a la velocidad;

$$div (\rho n \mathbf{v}) + \frac{\partial (\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

Que es la ecuación e la conservación de la masa para un medio deformable.



## 4.2 Conservación de la masa en un medio compresible.

El proceso de deformación con el tiempo de un medio por el cual circula un flujo transitorio se le denomina consolidación. El flujo transitorio genera un problema acoplado: “deformación por flujo hidrodinámico”.

Los efectos transitorios en sistemas acuíferos aparecen cuando los valores de frontera tales como la recarga, extracción y cambio de almacenamiento varían con el tiempo. Los fenómenos transitorios producen efectos que pueden observarse en:

- Cuando se activa el bombeo en un acuífero confinado las cargas y presiones cambian gradualmente hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio.
- En mecánica de suelos aparece cuando los estratos se consolidan bajo la presión de superestructuras.
- La declinación del nivel estático ocasiona cambios en el campo de esfuerzos efectivos, generando los procesos de hundimiento (Fase 1), aparición de grietas de tensión (Fase 2) y crecimiento de fallas (Fase 3).

La ecuación 17 se desarrolla para describir y simular el proceso de flujo hidrodinámico y deformación de un medio compresible:

$$\operatorname{div}(\rho n \mathbf{v}) + n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad (18)$$

Descomponiendo la ecuación 11 en función de la relación de vacíos, esfuerzo efectivo, desarrollándola y derivándola respecto al tiempo “t”, queda que:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (19)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a_v \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right\} \quad (20)$$

Sustituyendo 6 en 20 se tiene que:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -a_v (1 - n)^2 \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right\} \quad (21)$$

Descomponiendo a la ecuación 2 y derivando respecto al tiempo,

$$\beta\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (22)$$

Sustituyendo 22 y 21 en 18, recordando que la carga normal  $\sigma$  permanece constante en los problemas de flujo hidrodinámico:

$$\text{div}(\rho n \mathbf{v}) + \rho(n\beta + a_v(1-n)) \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

Como  $\mathbf{v}$  es el vector de velocidades definido como  $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ ; considerando el sentido vertical exclusivamente, la componente de la velocidad  $\mathbf{w}$  en función de la carga hidráulica "h" es:

$$w = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (24)$$

Sustituyendo 24 en 13 y simplificando:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{(n\beta + a_v(1-n))}{K_z} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (25)$$

El coeficiente de almacenamiento (S) establece la relación entre los cambios en la cantidad de agua almacenada en el acuífero y los correspondientes a las elevaciones piezométricas, donde aparecen las relaciones entre compresibilidad o expansión tanto del agua como de la formación acuífera, el coeficiente de almacenamiento S está dado por:

$$S = n\beta + a^*_v(1-n) \quad (26)$$

Como comparación resulta que el coeficiente de compresibilidad del suelo es  $a^*_v = 0.0495 \text{ cm}^2/\text{kg}$ , mientras que el del agua a  $20^\circ \text{ C}$  es  $0.0000442 \text{ cm}^2/\text{kg}$ .

Por tanto, la ecuación que representa el problema acoplado de flujo-deformación queda como:

$$\nabla^2 h = \frac{S}{K_z} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (27)$$

El término de la izquierda de la ecuación 27 representa “el exceso de masa que sale sobre la que entra por unidad de volumen por unidad de tiempo en función de la distribución de cargas piezométricas; el de la derecha corresponde a la masa de fluido liberado y su relación a la matriz sólida comprimida por unidad de volumen, “ $u$ ” corresponde a la declinación de la superficie piezométrica en la misma unidad de tiempo.

### 4.3 Solución a la ecuación de flujo-deformación.

El desarrollo de un acuífero es en función directa del almacenamiento donde se genera un conoide de abatimiento, bajo estas circunstancias, las ecuaciones de equilibrio sobrestiman la permeabilidad ( $K$ ) y por tanto la producción del acuífero.

Para encontrar las condiciones de equilibrio, C.V. Theis y Jacob hicieron las aproximaciones más reales a la naturaleza.

En el año de 1935 Theis presentó la solución a la ecuación 17, usando la analogía de transferencia de calor descrita por la Ley de Biot-Fourier. Theis hizo dos consideraciones básicas para establecer la solución de 27:

- La carga “ $\sigma$ ” y espesor “ $H$ ” del acuífero son constantes, y
- Los cambios de almacenamiento del acuífero a través de la expansión del agua y compresión de la formación acuífera pequeños.

Theis y Jacob en 1938 y 1940 respectivamente, dedujeron que el abatimiento “ $s$ ” o declinación de la superficie piezométrica en un pozo de observación localizado a una distancia “ $r$ ” del de bombeo es:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \int_{\varphi}^{\infty} \frac{e^{-\varphi}}{\varphi} d \varphi \quad (28)$$

Siendo: ( $Q$ ) el bombeo, ( $T$ ) la transmisibilidad y ( $\varphi$ ) una variable sin dimensiones definida por:

$$\varphi = r^2 \frac{S}{4 \Gamma T} \quad (29)$$

Siendo ( $r$ ) la distancia del pozo de bombeo al pozo de observación, ( $S$ ) es el coeficiente de almacenamiento y ( $\Gamma$ ) el tiempo de bombeo.

La integral de la ecuación 28 es conocida como función de pozo de “ $\varphi$ ” y está definida por:

$$\int_{\varphi}^{\infty} \frac{e^{-\varphi}}{\varphi} = W(\varphi) = -0.577162 - \ln(\varphi) + \varphi + \frac{\varphi^2}{2 * 2!} + \frac{\varphi^3}{3 * 3!} + \dots \quad (30)$$

$$\therefore s = \frac{Q}{4\pi T} W(\varphi)$$

La expresión 27 corresponde a la solución de la ecuación de flujo; donde están involucradas tanto la compresibilidad del fluido como la de los granos del suelo y de la nueva distribución de cargas hidráulicas ( $h$ ).

El abatimiento ( $s$ ) corresponde al intervalo drenado por la declinación de la superficie piezométrica, que al multiplicarlo por el área se obtiene el volumen del suelo donde se llevarán a cabo los cambios significantes en el campo de esfuerzo efectivo.

Dependiendo del volumen de agua extraído ( $\Delta V$ ) y de la pérdida de presión de poro ( $-u$ ) en un intervalo de tiempo ( $-\partial u/\partial t$ ); se asentará “ $\Delta H$ ” debido al abatimiento de la superficie piezométrica.

Si se tiene un campo de pozos, definida su ubicación en función de columnas  $j$  y renglones  $i$  separados una distancia  $x$  e  $y$  en un área donde la extracción es mayor a la recarga (cambio en las condiciones de frontera), el abatimiento o declinación de la superficie piezométrica equivalente al espesor drenado compresible es:

$$s = \sum_{m=1}^l Q_m W(\varphi)_{i,j,m} \quad (31)$$

La deformación parcial está dada por:

$$\Delta \delta H = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta \sigma' \cdot s \cdot U(\%) \quad (32)$$

El asentamiento parcial ( $\Delta \delta H$ ) según su grado de consolidación  $U(\%)$  en un intervalo de tiempo creado por el abatimiento  $s$  la superficie piezométrica debido a un flujo  $Q_m$  a través de “ $l$ ” pozos distribuidos en “ $i$ ” renglones y “ $j$ ” columnas por la extracción es:

$$\Delta \delta H_{i,j,m} = \frac{a_v}{1 + e_0} \cdot \Delta \sigma' \cdot \sum_{m=1}^l Q_m W(\varphi)_{i,j,m} \cdot U(\%) \quad (33)$$

#### 4.4 Modelo computacional para determinar la distribución del hundimiento en un estrato compresible debido al abatimiento de la superficie piezométrica.

El algoritmo para el cálculo de  $s$  fue desarrollado por King, J., 1983, la subrutina para la aproximación de  $W(\varphi)$  fue probada y comparada con otras soluciones dadas con anterioridad (Theis C. V., 1935), los valores calculados resultaron confiables dentro del rango de seguridad requerida tanto en flujo hidrodinámico como en mecánica de suelos. El diagrama de flujo del programa aparece en la figura 4.2, mientras que las líneas de programación se presentan en el Apéndice A.

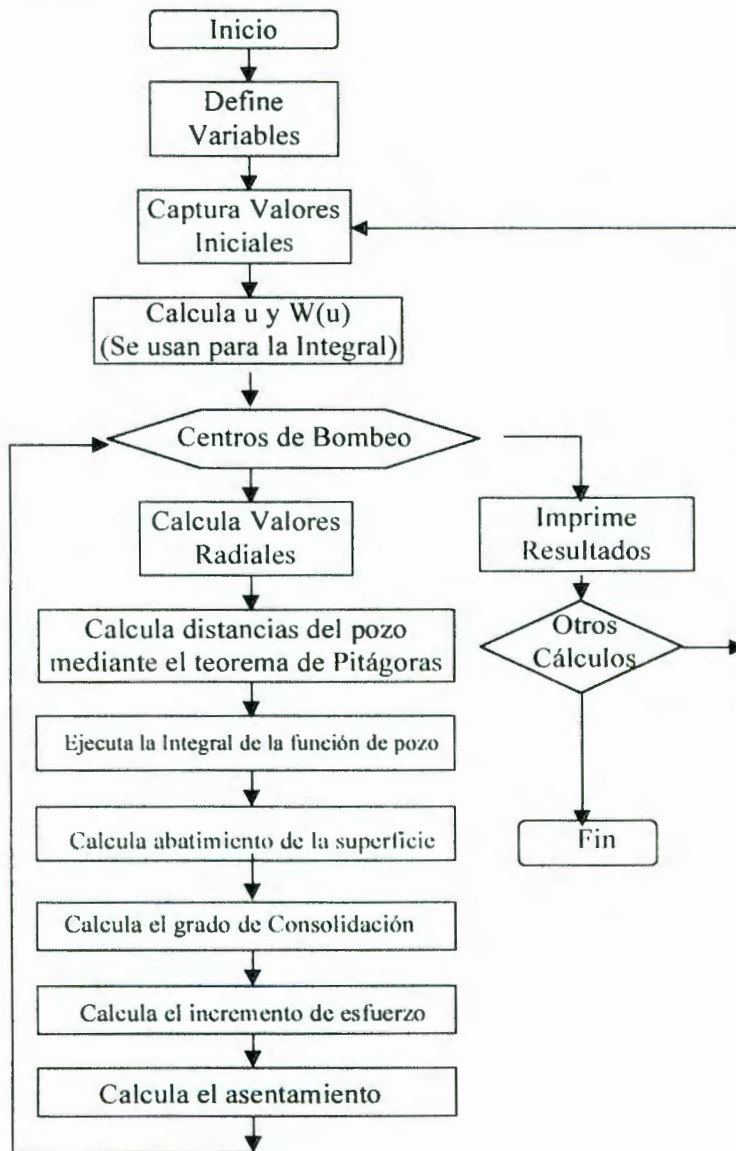


Figura 4.2. Diagrama de flujo del programa para el cálculo de Flujo-Deformación.

El método propuesto para el cálculo del asentamiento requiere que en el área de interés se forme una malla de dimensiones variables (figura 4.3) y se ubiquen los pozos de bombeo, cada uno de los nodos corresponde a un pozo de observación.

Después de alimentar los datos, el programa calcula el argumento de  $\phi$ ; por medio del Teorema de Pitágoras establece la distancia entre los pozos de bombeo y los nodos; la solución a la integral de la función de pozo se determinó por medio de la aproximación polinomial dada por Gautschi y Cahill, 1964 mediante la serie dada en 30.

Considerando que la recarga es mínima, el valor calculado de  $W(\phi)$  se emplea en la ecuación 31 para obtener el espesor drenado ( $s$ ), que al multiplicarlo por ( $S$ ) -relación algebraica entre el incremento del esfuerzo efectivo ( $\partial\sigma'$ ), porosidad ( $n$ ), permeabilidad ( $K_z$ ) y coeficiente de compresibilidad ( $\alpha_v$ )- se obtiene el asentamiento producido por la extracción de ( $Q$ ) en ( $l$ ) pozos durante un tiempo ( $t$ ).

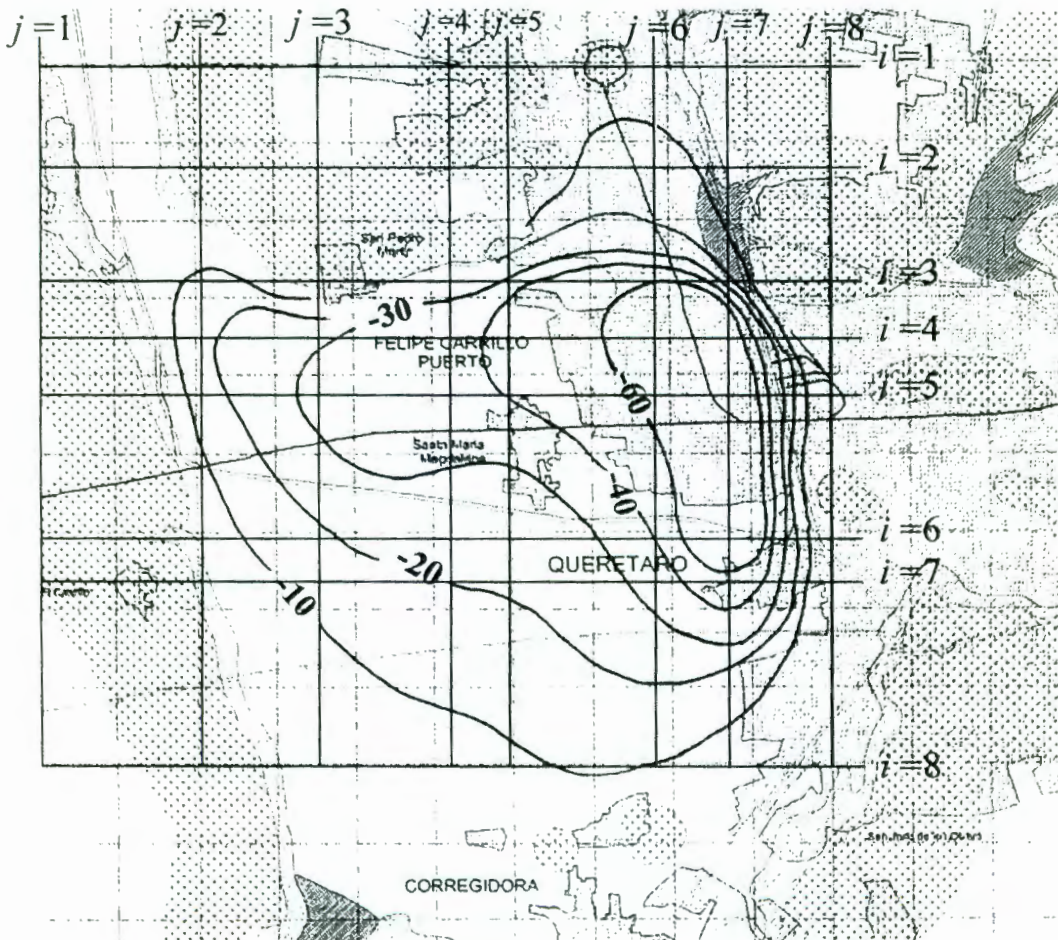


Figura 4.3. Evolución del nivel estático de Diciembre de 1989 a Noviembre 1998 y malla para el cálculo del asentamiento de 1989 a 1998.

#### 4.4.1 Generalidades del programa de simulación de hundimiento.

El programa determina el abatimiento ( $s$ ) y va cambiando los valores de la velocidad de bombeo  $Q_m$  y el radio del pozo de extracción hasta que la configuración del abatimiento calculada sea similar a la observada en el intervalo de tiempo prescrito. La configuración de referencia corresponde a la evolución del nivel estático de 1989 a 1998 (figura 4.3).

Posteriormente con los parámetros mecánicos e hidráulicos tales como: la relación de vacíos ( $e_0$ ), coeficientes de compresibilidad tanto del agua ( $\beta$ ) como de los sólidos ( $\alpha_v$ ), almacenamiento ( $S$ ) y transmisibilidad ( $T$ ) se evaluó el hundimiento ( $\Delta H$ ). Los parámetros mecánicos están descritos en el Capítulo 3 y los hidráulicos se dan en la referencia 59.

Dado que se conoce la configuración de referencia formada por los puntos materiales  $p$  en el cuerpo  $B$ , esto es, al abatimiento en el intervalo de 1989 a 1998, la función de deformación  $f$  de la ecuación 33 se aplicó para obtener las configuraciones espaciales  $x = f(p) \in f(B)$  del asentamiento para los años 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997 y 1998.

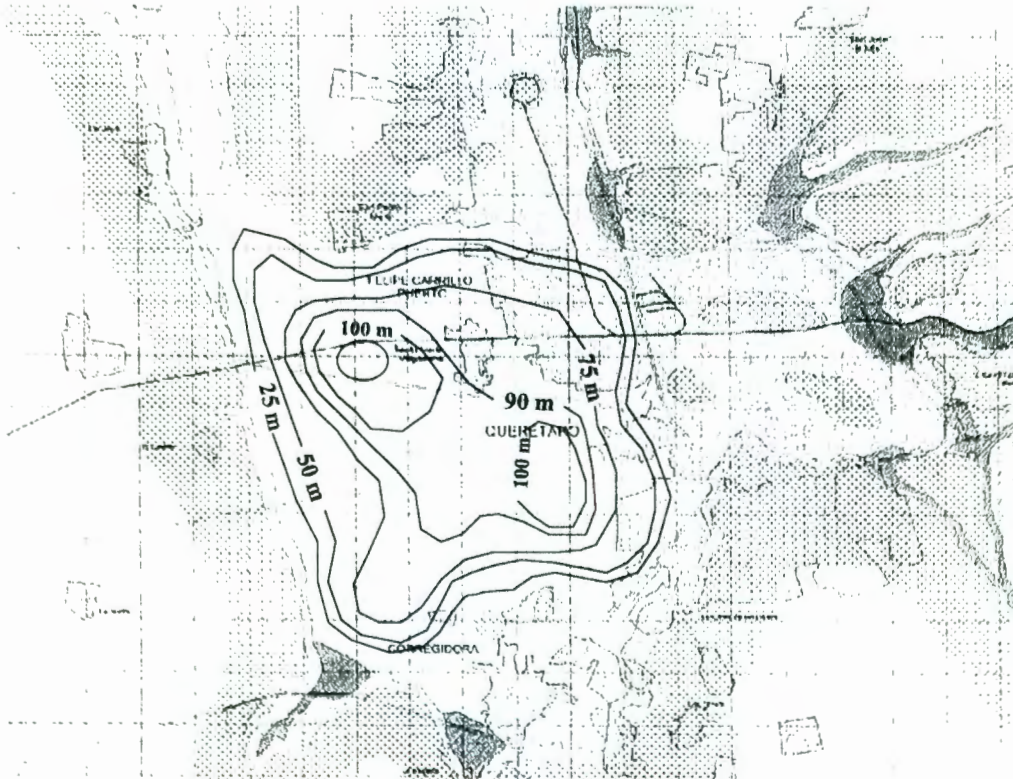


Figura 4.4. Profundidad al basamento geotécnico formado por la Unidad Menchaca (Tmbm).

La configuración del basamento (figura 4.4) muestra un cambio importante hacia el oriente, por debajo y paralelo a la Avenida 5 de Febrero, la profundidad al basamento cambia de 50 a 75 metros en una corta distancia. Tanto la "Falla Tectónica Centro" sepultada por tobos y depósitos lacustres como el hundimiento por la sobreexplotación coadyuvan a las Fases de generación de grietas y crecimiento de fallas.

En los sectores poniente, sur y norte el cambio es brusco de 25 a 50 metros de profundidad, hacia el centro del valle el espesor promedio de los materiales hasta el basamento geotécnico es de 110 metros.

El cuadro 4.1 muestra los parámetros mecánicos, hidráulicos y las dimensiones respectivas que sirven para alimentar el programa que proveerá los datos numéricos para visualizar a través del tiempo el desarrollo del asentamiento. La correlación óptima se obtuvo con una malla formada por ocho renglones y ocho columnas, equivalente a 64 nodos, de los cuales solamente fueron empleados 29 para ubicar en ellos a los pozos de observación.

**Cuadro 4.1. Datos de alimentación al programa de simulación de hundimiento**

<b>DATOS</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>UNIDADES</b>
Espacios entre renglones y columnas ( $i, j$ )	L	metros
Coefficiente de almacenamiento ( $S$ )	sin dimensiones	
Transmisibilidad ( $T$ )	$L^2/T$	$m^2/día$
Longitud del período de bombeo ( $t$ )	T	días
Permeabilidad ( $K_z$ )	L/T	metros/día
Coefficiente de compresibilidad del agua local ( $\beta$ )	$L^2/M$	$m^2/t$
Coefficiente de compresibilidad ( $\alpha_v$ )	$L^2/M$	$m^2/t$
Relación de vacíos ( $e_0$ )	sin dimensiones	
Período de bombeo en días ( $t$ )	T	días
Número de pozos ( $l$ )		Pozos
Caudal de extracción " $Q$ "	M/T	$m^3/día$
Radio del pozo de observación y extracción ( $r$ )	L	metros

Con la información que aparece en el cuadro 4.2 se consiguió reproducir el abatimiento en el intervalo de Diciembre de 1989 a Noviembre de 1998; en ella aparecen los parámetros mecánicos del suelo, así como los hidráulicos del acuífero. Con un total de 29 pozos de observación fue posible conformar las configuraciones de asentamiento para los años 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997 y 1998.

En el inciso siguiente se describen los resultados de la simulación, las deformaciones considerables aparecen en la región oriente, lugar geográfico de la Zona Industrial Benito Juárez, sector poniente de la Zona Metropolitana de Querétaro y mayor concentración de pozos para abastecer de agua la Ciudad.



Cuadro 4.2. Datos y parámetros para el uso del programa de simulación de hundimiento en el Valle y Zona metropolitana de Querétaro.

Fecha: 13 Octubre 1999  
 Proyecto: Mecanismo de Agrietamiento en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro.

Incremento de esfuerzo efectivo (t/m<sup>2</sup>): 65  
 Coeficiente de compresibilidad (m<sup>2</sup>/t): 0.0451  
 Coef de compresibilidad del agua(m<sup>2</sup>/t): 442E-6  
 Relacion de vacios inicial : 1.112  
 Coeficiente de almacenamiento: 0.0135  
 Transmisibilidad (m<sup>2</sup>/día): 390  
 Número de pozos para la simulación: 29  
 Longitud del período de bombeo (días): 365, 730, 1095, 1460, 1825, 2190, 2555, 2920, 3285

Numero de renglones: 8 Numero de columnas: 8

Renglon	Espaciamiento	Columna	Espaciamiento
0	0	0	0
1	1300	1	2100
2	1900	2	1650
3	750	3	1950
4	1000	4	800
5	1800	5	1950
6	600	6	900
7	2600	7	1450

Pozo	Coord. cuadrícula	Vel. de Bombeo	Radios
1	2 , 6	200	1.5
2	3 , 2	350	1.5
3	4 , 5	750	2.5
4	4 , 6	1200	2.5
5	5 , 3	550	2.5
6	5 , 7	1200	3.5
7	6 , 7	1100	2
8	6 , 5	400	2
9	7 , 7	1800	2
10	8 , 4	5	.2
11	5 , 2	250	1.5
12	7 , 3	300	1.5
13	3 , 6	950	3
14	5 , 6	1100	2
15	6 , 6	750	2.7
16	8 , 7	700	1
17	3 , 5	550	1
18	4 , 4	500	2.5
19	8 , 6	750	.5
20	4 , 2	200	1
21	7 , 4	250	2
22	5 , 4	550	1
23	4 , 7	900	2
24	7 , 5	300	1
25	6 , 8	50	2
26	4 , 8	50	2
27	4 , 3	500	2
28	6 , 3	250	2.5
29	5 , 8	50	2

#### 4.4.2 Ejemplo: cálculo y características de la evolución del asentamiento en el “Valle y Zona Metropolitana de Querétaro”, Qro. 1989-1998.

En el Valle de Querétaro la distribución de las rocas permeables y su posición en la columna geológica no permiten que exista una disponibilidad importante de agua subterránea, por lo que la demanda afectará directamente al almacenamiento ocasionando la declinación de la superficie piezométrica y por tanto efectos geotécnicos como: hundimiento, generación de grietas, crecimiento de fallas que distorsionan las estructuras por donde se ubican.

La figura 4.5 muestra el acoplamiento entre el abatimiento de la superficie piezométrica y el asentamiento para los sectores poniente y oriente; en el primero la deformación acumulada es de 0.26 m con un abatimiento promedio de 15.5 metros, mientras que para el segundo, zona sobreexplotación debido a la concentración de pozos industriales, agrícolas y de agua potable, la deformación se evaluó en 1.22 metros.

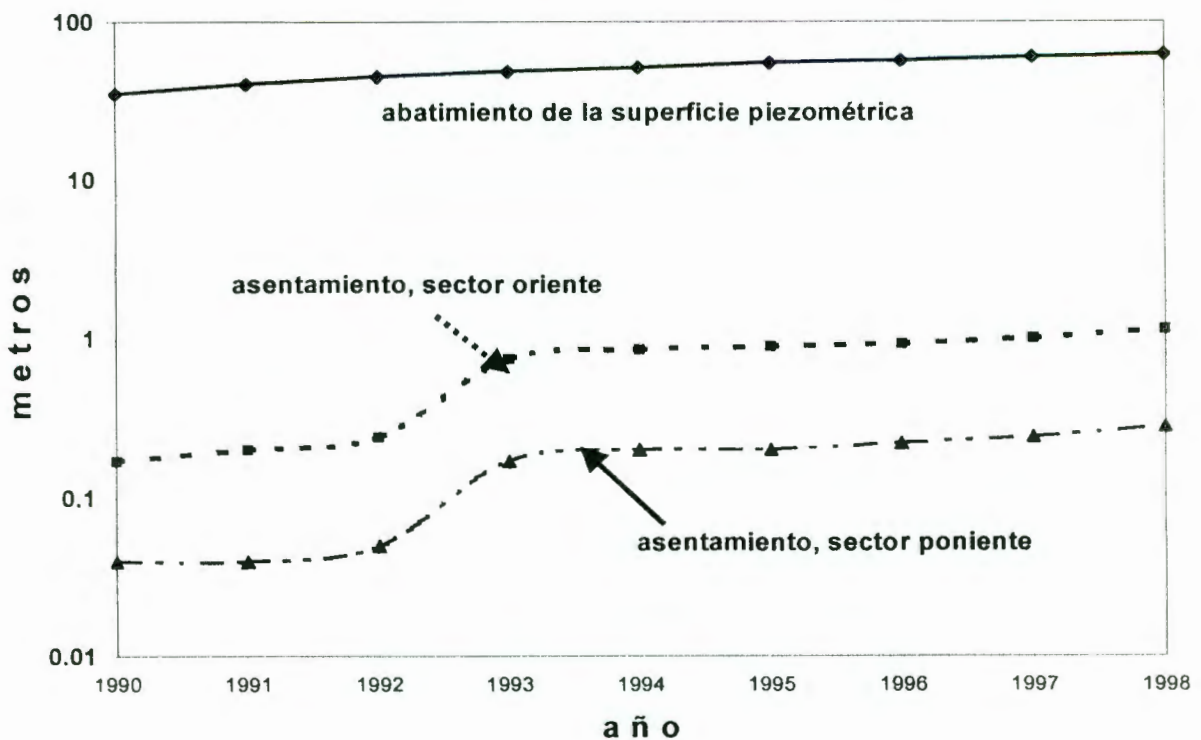


Figura 4.5. Relación gráfica entre el abatimiento y el asentamiento para los sectores oriente y poniente del Valle de Querétaro.

Los resultados de los períodos: 365, 730, 1095, 1450, 1825, 2190, 2555, 2920 y 3285 días de esfuerzo considerados para determinar el asentamiento aparecen en el Apéndice B; las configuraciones son mostradas en las figuras 4.6 a 4.14.

La figura 4.6 muestra la configuración del asentamiento para el año 1990, después de 365 días de bombeo, las líneas de igual asentamiento seleccionadas fueron las de 0.05 m, 0.10 m y 0.15 m; aparece un cierre con las magnitudes de 0.10 y 0.15 metros alargado en la dirección NNW-SSE en la Zona Industrial Benito Juárez y al poniente de la Avenida 5 de Febrero.

A los 730 días de bombeo, figura 4.7, la línea de 0.05 metros se dibuja solamente al poniente, las líneas de 0.10 y 0.15 aparecen casi circulares abarcando las colonias de Carrillo, San Pedro La Punta, CEA y la Zona Industrial Benito Juárez.

Posterior a 1095 días de bombeo, la declinación promedio de la superficie piezométrica ha sido de 20 metros, generando un asentamiento de 0.04 metros al poniente y de 0.01 metros para el oriente; acumulado es de 0.24 metros abarcando prácticamente la Zona Industrial Benito Juárez, ver figura 4.8. Las deformaciones considerables se dan en las vías terrestres.

El cuarto período de esfuerzo corresponde a 1460 días de bombeo donde se puede configurar la línea de 0.50 metros que se muestra como una elipse (figura 4.9) con su eje mayor paralelo a la Avenida 5 de febrero.

En el año de 1994 el intervalo de bombeo es de 1825 días, apareciendo un asentamiento de 0.11 metros al oriente y 0.03 metros al poniente; como se puede apreciar en la figura 4.10 la línea de igual hundimiento de 0.5 metros se ha extendido hacia el norte y noroeste. La línea de 0.20 metros de asentamiento alcanza la zona poniente.

La sobreexplotación del acuífero en la Zona Industrial Benito Juárez es tan fuerte que en el año 1995 la superficie piezométrica ha declinado 40 metros ocasionando un asentamiento acumulado de 0.75 metros, tal y como se aprecia en la figura 4.11; en el poniente la extracción es moderada y el asentamiento para ese año fue de solo 0.03 metros.

Después de 2555 días de bombeo con poca recarga y extrayendo agua a costa del almacenamiento, el hundimiento acumulado llega a ser de 1.00 metros hacia el noroeste de la Zona Metropolitana de Querétaro, figura 4.12, el cono de abatimiento se desarrolla orientado NNW-SSE y se extiende por el subsuelo de las colonias Jardines del Ensueño y Hacienda, donde se da el crecimiento de las fallas conocidas como: "Jardines y San Diego La Carambada". Una gran cantidad de casas sufrió daños y deformaciones en sus estructuras.

Hacia el sudoeste la línea de igual hundimiento acumulado de 0.20 metros crece hacia Balbanera, donde comienzan a suscitarse una familia de grietas de tensión denominadas "San Pedro Mártir-Villa Corregidora y Pirámide". El casco de la Ex Hacienda Balbanera presenta grietas de considerable magnitud.

La figura 4.13 exhibe la configuración del asentamiento acumulado posterior a 2920 días de bombeo, en la periferia se aprecia la línea de 0.25 metros, la cual hacia el poniente se acopla con la "Falla Tlacote-Las Adjuntas-La Negreta". En el poniente el hundimiento es de 1.05 metros aproximadamente, remarcando la "Falla 5 de Febrero".

El asentamiento acumulado para el período de esfuerzo comprendido entre Diciembre de 1989 y Noviembre de 1998 se muestra en la figura 4.14a, el cual se ajusta de manera confiable a las mediciones realizadas por la Coordinación de Proyectos e Información de la Secretaría de Desarrollo Urbano, Obras Públicas y Ecología Municipal por medio de las observaciones de cotas en vértices geodésicos con la técnica del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) hasta Noviembre de 1998. Al oriente el asentamiento en 9 años es de 1.2 metros mientras que para el poniente es de 0.33 metros. Las zonas de agrietamiento potencial aparecen sombreadas con puntos en la figura 4.14b.

La figura 4.15 enseña el acoplamiento entre las grietas y fallas existentes con la configuración de hundimiento para el período de esfuerzo de 3285 días.

Los efectos geotécnicos ocasionados por el asentamiento debido a la sobreexplotación del acuífero son:

- deformación y colapso de inmuebles,
- daños a las vías terrestres,
- daños en la infraestructura hidráulica,
- cambios de pendiente en el flujo base de los Ríos Querétaro y Pueblito,
- colapso de ademes de pozos profundos de agua,
- rupturas en las líneas de conducción de gasolina,
- fracturas en canales de aguas residuales cuya filtración hasta el acuífero lo contaminan,
- incremento de aniones y cationes en el acuífero,
- hundimientos regionales (Valle de Querétaro) y local (Zona Industrial Benito Juárez),
- grandes erogaciones para gastos de conservación y mantenimiento,
- desequilibrio ecológico,
- pérdida del patrimonio familiar, etc.

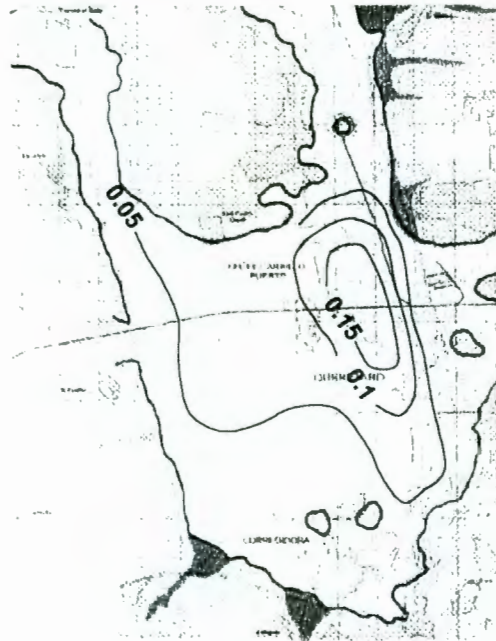


Figura 4.6. Configuración del asentamiento para 365 días de esfuerzo (1989-1990).

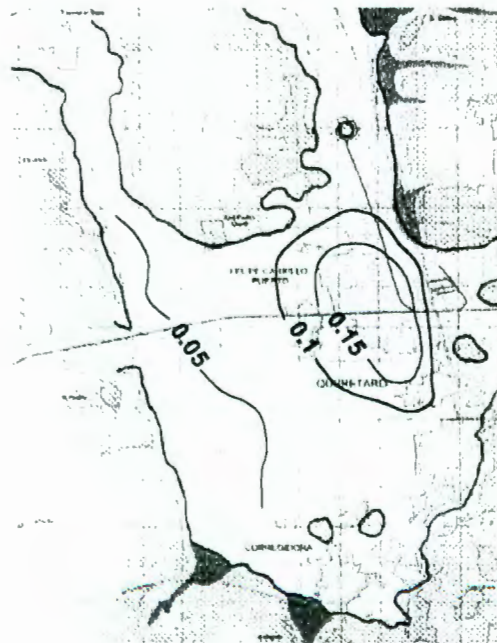


Figura 4.7. Configuración del asentamiento para 730 días de esfuerzo (1989-1991).

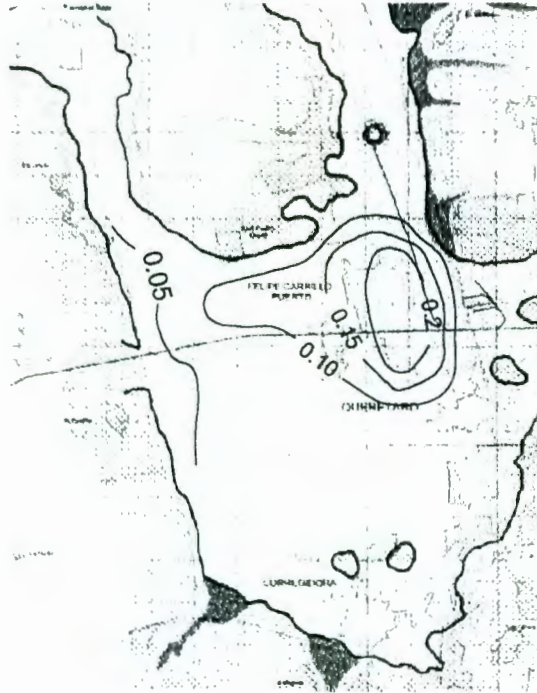


Figura 4.8. Configuración del asentamiento para 1095 días de esfuerzo (1989-1991).

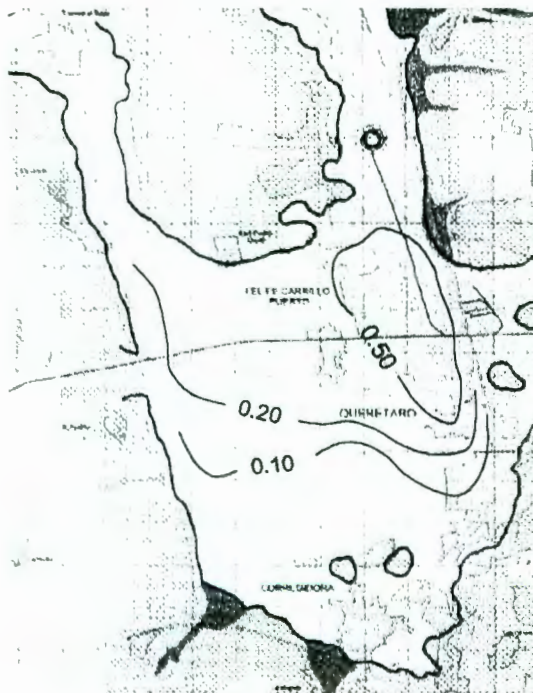


Figura 4.9 Configuración del asentamiento para 1460 días de esfuerzo (1989-1993).

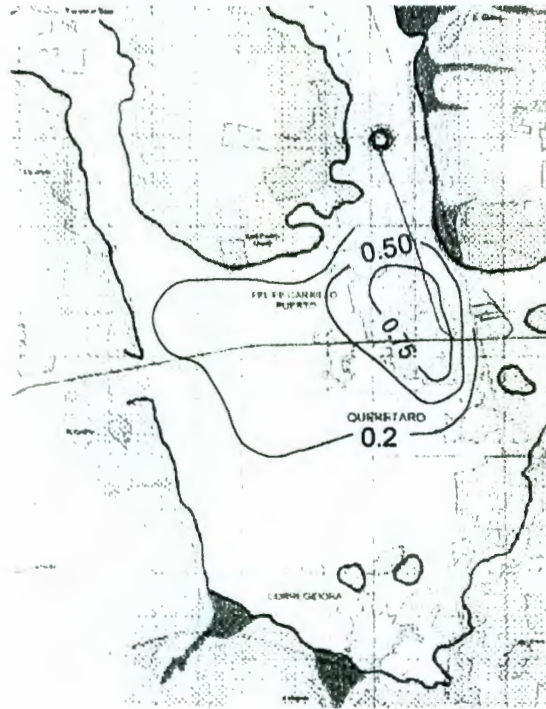


Figura 4.10. Configuración del asentamiento para 1825 días de esfuerzo (1989-1994).

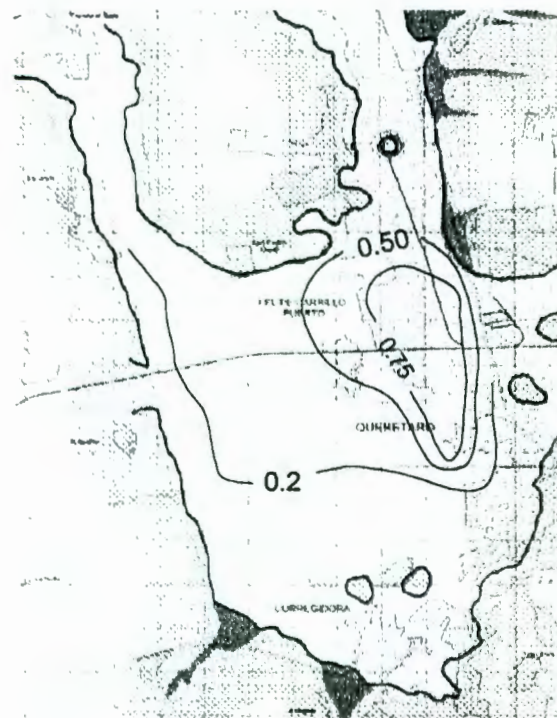


Figura 4.11. Configuración del asentamiento para 2190 días de esfuerzo (1989-1995).

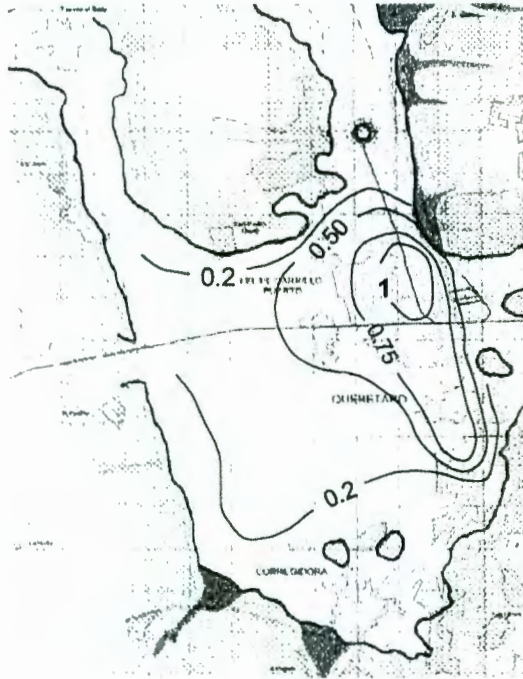


Figura 4.12. Configuración del asentamiento para 2555 días de esfuerzo (1989-1996).

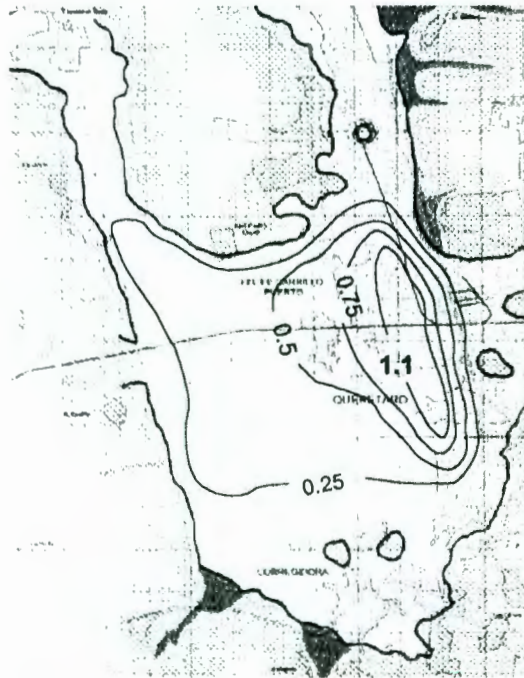


Figura 4.13. Configuración del asentamiento para 2920 días de esfuerzo (1989-1997).



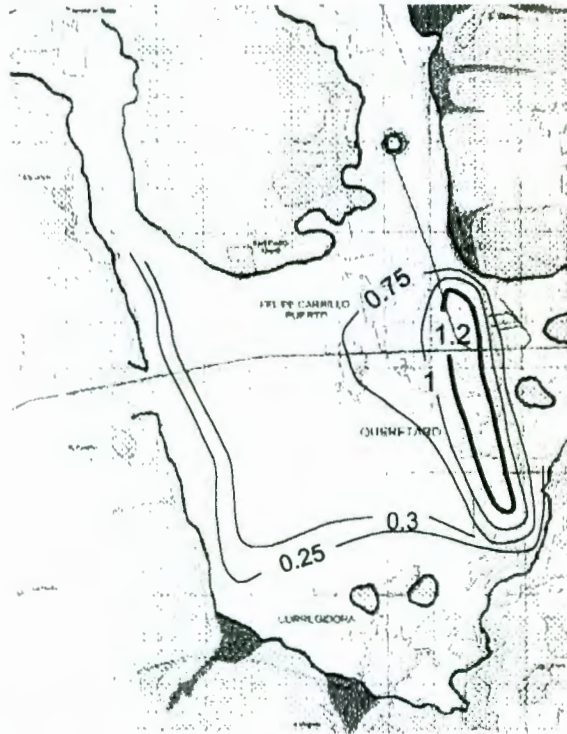


Figura 4.14a. Configuración del asentamiento para 3285 días de esfuerzo (1989-1998).

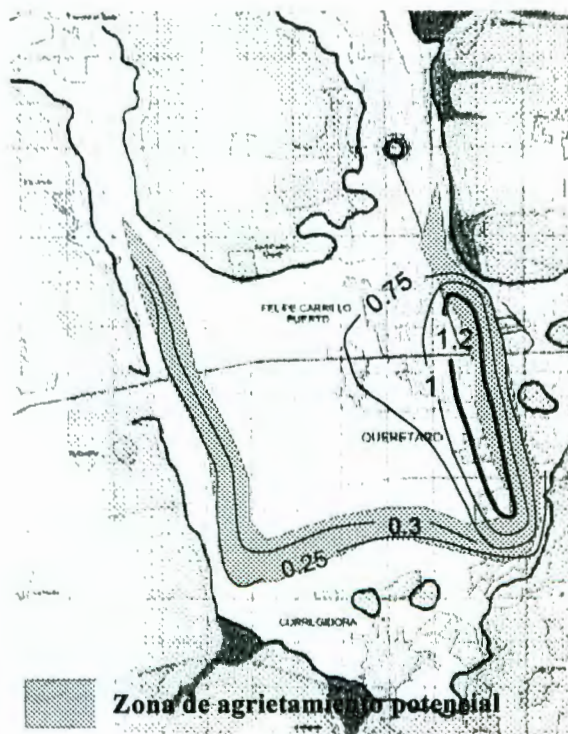


Figura 4.14b Zona de agrietamiento potencial por abatimiento de la superficie piezométrica.

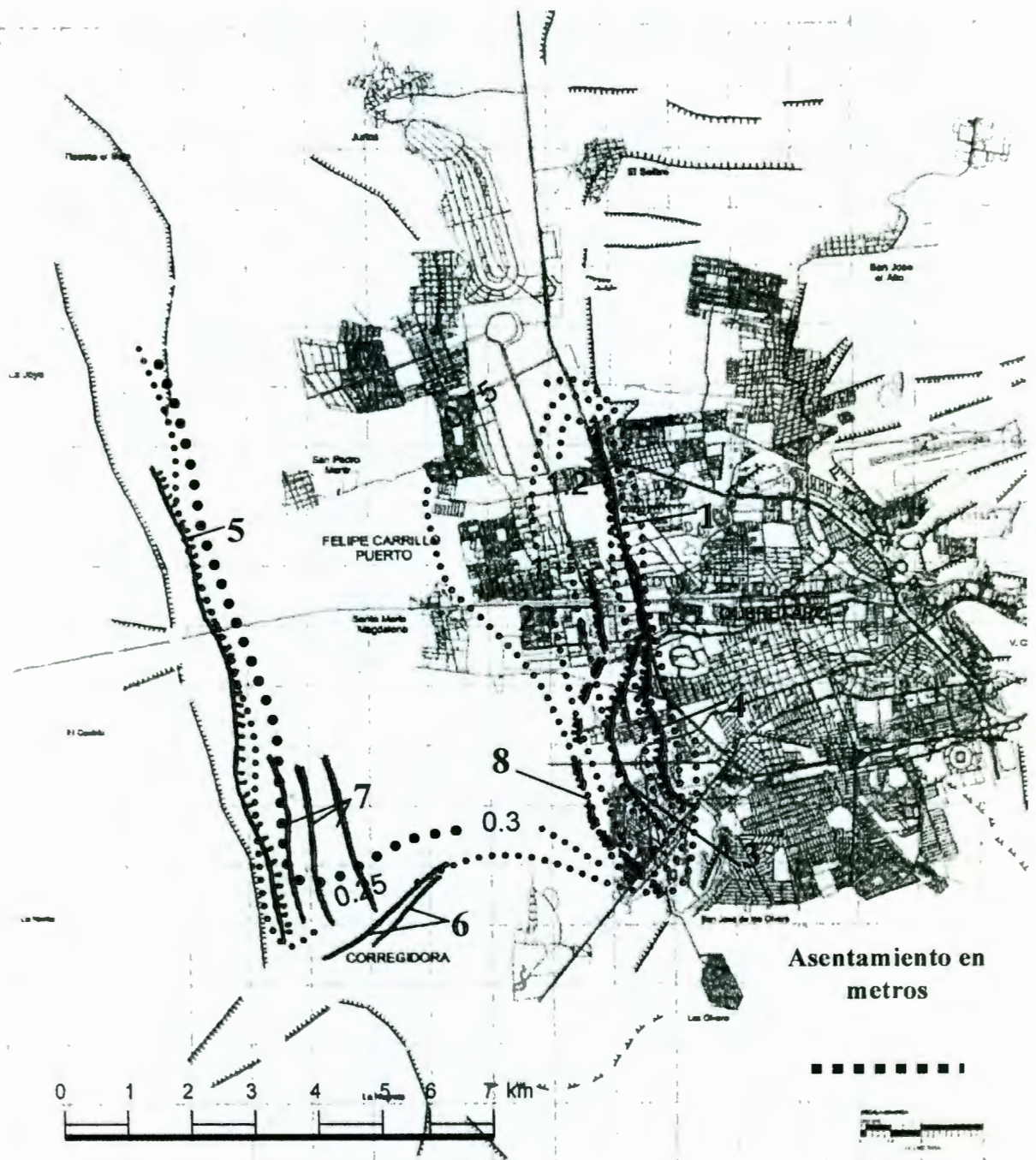


Figura 4.15. Configuración del asentamiento en el período (1989-1998), posición de las grietas y fallas debido a la sobreexplotación del acuífero, SDUOPEM (1998). 1. “Falla 5 de Febrero”; 2. “Falla Zona Industrial Benito Juárez”; 3. “Falla San Diego La Carambada”; 4. “Sistema de Fallas Jardines”; 5. “Falla Tlacote-Las Adjuntas-La Negreta”; 6. “Sistema de Grietas Pirámide” y 7. “Sistema de Grietas San Pedro Mártir-Villa Corregidora”; 8. “Grieta de tensión en formación según el análisis del abatimiento”.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

De la interpretación e integración de la información se presentan las conclusiones y recomendaciones siguientes:

### 5.1 Conclusiones.

- Los movimientos verticales del terreno se deben a dos causas esenciales: las “naturales” y las “antropogénicas”. Entre las primeras se tienen aquellas provocadas por el tectonismo y sedimentación, terremotos y disolución química; a las últimas se asocia la extracción de fluidos tales como hidrocarburos, minerales, vapor y principalmente al agua subterránea.
- Las deformaciones de la superficie de la tierra asociadas a las causas antropogénicas, fundamentalmente debido a la extracción del agua provocan fenómenos transitorios que pueden resumirse en tres fases:

Fase 1: Hundimiento por un abatimiento importante del acuífero,

Fase 2: Generación de grietas de tensión en los bordes del cono de abatimiento, y

Fase 3: Crecimiento de fallas

- Para determinar la contribución al hundimiento se debe tener un conocimiento confiable de la distribución de las Unidades Geológicas que conforman el graben, así como de sus propiedades mecánicas (coeficiente de compresibilidad) y características índice (relación de vacíos).
- Para evaluar el incremento de esfuerzo efectivo es necesario conocer la posición del nivel estático y su evolución dentro de la columna geológica, prescribiendo los intervalos drenados y los estratos geológicos envueltos.
- En la ecuación de flujo-deformación presentada para describir los procesos de hundimiento, generación de grietas y crecimiento de fallas; se relacionan íntimamente la compresibilidad tanto del agua como del acuífero, la relación de vacíos y el incremento del esfuerzo efectivo por declinación de la presión de poro.
- Conforme sobreviene el incremento del esfuerzo efectivo, la relación de vacíos disminuye al igual que la porosidad y permeabilidad.

- El programa desarrollado predice con bastante seguridad y dentro de las posibilidades del modelo, el abatimiento de la superficie piezométrica, el hundimiento respectivo y las zonas probables de generación de grietas.
- El sector oriente del Valle de Querétaro se ha hundido 1.2 metros en 9 años, mientras que el poniente 0.33 metros, según la aplicación del modelo y que concuerda con lo observado.
- Por la posición, extensión y desarrollo del cono de abatimiento, el Valle de Querétaro tiende a ser una cuenca endorreica.

## 5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

- Dado que los fenómenos transitorios envuelven un problema acoplado entre flujo hidrodinámico y deformación por variación en las condiciones de frontera, se recomienda de manera periódica realizar el censo de pozos de la zona de estudio, midiendo caudal de extracción, régimen de operación y profundidad del nivel estático.
- Por la declinación de la superficie piezométrica, durante el bombeo, diferentes estratos son afectados, por lo que se recomienda realizar pruebas de bombeo en pozos establecidos como piloto para determinar la variación espacial y temporal de la permeabilidad y su asociación al cambio en la relación de vacíos.
- Al conocer las Unidades Geológicas de cada pozo en una zona donde se presenta el hundimiento, generación de grietas de tensión y crecimiento de fallas, se recomienda tomar una muestra inalterada de cada estrato envuelto y llevarla hasta el nivel de esfuerzos prescrito en campo para poder determinar la compresibilidad ( $\gamma$ ) y la permeabilidad ( $k$ ) para poder alimentar al modelo.
- Para poder tasar el cambio en la presión de poro, se recomienda construir piezómetros en diferentes sitios y a profundidades variables que sirvan de verificación con los calculados.
- Con la ayuda del sistema de posicionamiento global (GPS) se recomienda medir cada mes la cota en los vértices geodésicos construidos por la Secretaría de Desarrollo Urbano, Obras Públicas y Ecología Municipal con objeto de verificar la velocidad y magnitud absoluta de las deformaciones y cotejar con los cambios medidos en los piezómetros.
- Con objeto de mitigar el hundimiento en el Valle de Querétaro, el modelo puede ser utilizado para establecer las zonas de recarga artificial mediante pozos de absorción, determinando el volumen de agua necesario.

## BIBLIOGRAFÍA:

- Abramowitz M., and Stegun I. A. (1964). "*Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*". Dover.
- Al-Khafaji A. W. and Andersland B. O. (1992). "*Geotechnical engineering and soil testing*". Saunders HBJ.
- Alonso M. J. J. (1999). "*Contribución al estudio del comportamiento de algunos factores que influyen en la deformación permanente de materiales granulares*". Aplicación a las vías terrestres". Tesis de Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres. FI de la Universidad Autónoma de Campeche.
- Alberro J. y Hernández R. (1991). "*Temblores inducidos por fuerzas de filtración*". Series del instituto de Ingeniería, No 530.
- Alvarez Manilla A. A. (1999). "*Growth faults: from groundwater extraction, Querétaro, Salamanca and Aguascalientes cases histories*". 2do Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Aguascalientes, Ags. Asociación Geohidrológica Mexicana y Comisión Nacional del Agua.
- Alvarez Manilla A. A. (1996). "*Similitud entre las ecuaciones de Consolidación y Flujo Hidrodinámico, Una forma para explicar el agrietamiento en los suelos del Valle de Querétaro*". V Congreso de ingeniería Civil en el estado de Querétaro. CICEQ y FI de la UAQ.
- Alvarez Manilla A. A. (1998). "*La Geotécnia Ambiental, base de la planeación y crecimiento de Santiago de Querétaro, Qro.*". Conferencia organizada por la Cámara Nacional de las Empresas de la Consultoría y la Facultad de Ingeniería de la Universidad autónoma de Querétaro.
- Alvarez Manilla A. A., Salas C. J. L., Fernández H. F. y García B. J. (1994). "*Geohidrología del Valle de Querétaro*". III Congreso de Ingeniería Civil en el Estado de Querétaro. FI de la Universidad Autónoma de Querétaro y Colegio de Ingenieros Civiles en el Estado de Querétaro.
- Alvarez Manilla A. A., Fernández H. F. y Salas C. J. L. (1997). "*Relaciones entre las Zonificaciones Geohidrológica, Geotécnica y su impacto en el Valle de Querétaro*". Primer Congreso Nacional de Aguas Subterráneas. Mérida, Yuc. Asociación Geohidrológica Mexicana, AC.

- Alvarez Manilla A. A., Poot L. R. M., Nisino S. O., Martín del C. A. R. y Ramírez C. M. S. (1998). “*Zonificación Geotécnica del Valle de Tesislán-Atemajac-Colimilla; Zona Metropolitana de Guadalajara, Jal.*” XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue..
- Alvarez Manilla A. A. y Rojas G. E. (1997). “*Flujo de contaminantes en las cimentaciones, Caso de Historia Planta PSC, SA de CV*”. V Congreso de ingeniería Civil en el estado de Querétaro. CICEQ y FI de la UAQ.
- Alvarez Manilla A. A., Romero M. R. y García B. J. (1998). “*Construcción del primer pozo de absorción para la recarga artificial del Acuífero de Santiago de Querétaro, Qro.*”. Primer Congreso Nacional de Aguas Subterráneas. Mérida, Yuc. Asociación Geohidrológica Mexicana, AC.
- Alvarez Manilla A. (1991) “*Abatimiento del acuífero del Valle de Querétaro y su importancia ambiental*”. Seminario Internacional de Aguas Subterráneas, FI de la UASLP.
- Alvarez Manilla A. y Pérez R. M de la L. (1996) “*Caracterización Geotécnica del valle de Querétaro*”. Trabajo de Investigación para la DEPMI de la UAQ.
- Alvarez Manilla A. A. y Pérez R. M de la L. (1996) “*Subsidencia y fallamiento en el Valle de Querétaro*”. XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Morelia, Mich.
- Alvarez M. E. (1992). “*Optimización del aprovechamiento del Acuífero del Valle de Querétaro, con base en un modelo de simulación del flujo*”. Tesis de Maestría en Ingeniería (Hidráulica). DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bear J. (1972). “*Dynamics of fluids in a porous media*”. Dover.
- Bowles E. J. (1982). “*Propiedades geofísicas de los suelos*”. McGraw Hill.
- Canal de la., J. (1988). “*Diccionario de sinónimos e ideas afines*”. SECSA.
- Castany G. (1971). “*Tratado práctico de las aguas subterráneas*”. Omega.
- Chen H. Z. (1995). “*Stress theory and axiomatics as well as consolidation theory of unsaturated soils*”. Unsaturated Soils, Alonso & Delage (eds). París, 1995, Francia.
- Chinesta F., Olmos F., Poitou A. y Torre R. (1996). “*Mecánica de los medios continuos*”. Universidad Politécnica de Valencia.

- Celanese Mexicana, SA de CV (1990). "*Estudio Geohidrológico y Balance Preliminar de Agua Subterránea en la vecindad del Complejo Industrial Benito Juárez, Querétaro*" Contrato RC45489-1. Geo Ingeniería Alfven, SA de CV.
- Collie M. J. (1978). "*Gethermal Energy, Recent Developments*". Noyes Data Corporation.
- Comisión Federal de Electricidad (1987). Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios Geotérmicos. "*Mediciones de Subsistencia en Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue y La Primavera, Jal.*". Informes Internos.
- Cortés B. J. de J., Olivares S. E., Monroy N. A. y Vázquez S. E. (1997). "*Interpretación de pruebas de bombeo para medios fracturados de calizas*". Tesis Doctoral. Facultad de Agricultura. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Das M., B. (1990). "*Principles of geotechnical engineering*". PWS-Kent.
- Domenico P. A. and Schwartz F. W. (1990). "*Physical and Chemical Hydrology*". Jhon Willey and Sons.
- Fyfe W. S., Price N. J. and Thompson A. B. (1978). "*Fluids in the earth's crust*". Elsevier Scientific Publishing Company.
- Gautschi W. and Cahill W. F. (1964). "*Exponential integral and related functions*". "*Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*". US Department of Commerce, national Bureau of Standards Applied Math. Dover.
- Gobierno del Estado de Querétaro. CEA. (1997). "*Plan de apoyo integral del agua subterránea para los principales valles del Estado de Querétaro*". Guy, SA.
- Gómez L. J. A. (1996). "*Efecto de rotura de granos en material de balasto bajo carga repetida*". Tesis de Maestría en Ingeniería (Construcción). DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Herbert W. and Anderson M. (1982). "*Introduction to ground water modeling*". Freeman Pu.
- Horta R. J. y San Román G. G. (1992). "*Estudio de proyección en los abatimientos de los niveles estadísticos en el acuífero de la Ciudad de Querétaro*". Revista Avances, UAQ. Octubre de 1992.
- Horta R. J. (1995). "*Notas del curso de Mecánica del Medio Continuo*". DEPMI de la UAQ.
- Horta R. J. (1994). "*Seguimiento analítico para el control de abatimientos en un acuífero, Caso Querétaro*". III Congreso de ingeniería Civil en el estado de Querétaro. CICEQ y FI de la UAQ.

- Hunt E. R. (1984). "*Geotechnical engineering investigation manual*". McGraw Hill Book Co.
- Huntoon P. W. (1980). "*Computationally efficient polynomial approximations used to program the Theis equation*". *Ground Water*. V. 18, pp. 134-136.
- Ivo Kazda (1990). "*Finite element techniques in ground water flow studies*". Elsevier.
- Jacob C. E. (1940). "*On the flow of water in an elastic artesian aquifer*. *Trans. Amer. Geophys. Union*.
- Juárez B. E. (1961). "*Mecanismo de las grietas de tensión en el Valle de México*". Tesis Doctoral de Ingeniería. DEPI de la UNAM.
- Juárez B. E. y Rico R. A. (1995). "*Mecánica de suelos (Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Tomo I)*". Limusa.
- Juárez B. E. y Rico R. A. (1995). "*Mecánica de suelos (Flujo de agua en suelos, Tomo III)*". Limusa.
- Juárez B. E. (1989). "*General compressibility equation for soils*". Curso Internacional de mecánica de Suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro (México) y Universidad de Laval (Canadá).
- Kim J. D., Feyen J., Angulo J. R. and Vauclin M. (1995). "*Comparison of eulerian and Lagrangian approaches in soil deformation and water flow*". *Unsaturated Soils*, Alonso & Delage (eds). París, 1995, Francia.
- King J. M. (1984). "*Computing Drawdown distributions using microcomputers*". *Ground Water*-November-December 1984. V. 22. No 6.
- Krumbein W. C. y Sloss L. L. (1969). "*Estratigrafía y sedimentación*". Uteha.
- Lapedes D. N. (1977). "*Geological Sciens*". McGraw Hill.
- Lesser I. J M., Sánchez D. F. y González P. D. (1990). "*Aspectos geohidrológicos de la Ciudad de México*". *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*/enero-abril de 1990.
- López L. T. (1995). "*Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Juríca, Querétaro*". Tesis de Maestría en Ingeniería. DEPI de la Universidad Autónoma de Querétaro.



- Martín del C. A. R., Ramírez C. M. S. y Alvarez Manilla A. A. (1998) “*Mapa de Isoperíodos y Zonificación Zonificación Sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jal.*” XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue..
- Meinzer E. O. (1942). “*Hydrology*”. Mc Graw Hill.
- Marsal R. J. y Masari M. (1959). “*El subsuelo de la Ciudad de México*”. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Middleton G. V. and Wilcock R. P. (1994). “*Mechanics in the earth and environmental sciences*”. Cambridge.
- Mooser F., Taméz E., Santoyo E., Holguín E. y Gutiérrez C. E. (1990). “*Características Geológicas y geotécnicas del valle de México*”. Construcción del Metro, Ciudad de México; Secretaría General de Obras, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano. DDF.
- Ortega A. G. (1996). “*Variability of the coefficient of consolidation of the Mexico City clayey sediments on spatial and time scales*”. Bulletin of International Association of Engineering Geology. París-No 54-October 1996.
- Picking, L. W. (1979). “*Programming a pocket calculator for solving multiple well, variable pumping rate problems*”. Ground Water. V. 17, pp. 205-208.
- Poot L. M. R., (1999). “*Modelo constitutivo para suelos no saturados expansivos*”. Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería. DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Preciado C. H. F. (1998). “*Estudio de la influencia de las variables de compactación en las características expansivas de un suelo de Juríca, Querétaro*”. Tesis de Maestría en Ingeniería. DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- SHCP y Nacional Financiera, SA (1969). “*El hundimiento de la Ciudad de México, Proyecto Texcoco, Nabor Carrillo*”.
- Strack D. L. O. (1989). “*Ground Water Mechanics*”. Prentice Hall.
- Secretaría de Desarrollo Urbano, obras Públicas y Ecología Municipal de Santiago de Querétaro. (1998). “*Mapa de Fallas y Zonas de Riesgos Geotécnico y Geológico del Valle y Zona Metropolitana de Querétaro*”. Geo Ingeniería Alfven, SA de CV.

- Theis C. V. (1935). "*The relationship between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*". American Geophysicist Union Trans. V. 6. Pp. 519-524.
- Timoshenko S. P. and Goodier J. N. (1970). "*Theory of Elasticity*". McGraw Hill.
- Trejo M. A. (1989). "*Estratigrafía y propiedades mecánicas del subsuelo del Valle de la Zona Urbana de Querétaro*". Universidad Autónoma de Querétaro.
- Touloukian Y. S. and Ho C. Y. (1981). "*Physical properties of rocks and minerals*". McGraw Hill.
- Universidad Autónoma de Querétaro. Laboratorio de Mecánica de Suelos. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. (1994-1999). "*Diversos trabajos y estudios de mecánica de suelos aplicada en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro*". DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Universidad Autónoma de Querétaro. Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Licenciatura en Ingeniería Civil. (1994-1999). "*Diversos trabajos y estudios de mecánica de suelos aplicada en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro*". FI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Viessman W. Jr., and Lewis G. (1996). "*Introduction to Hydrology*". Harper Collins, Co.
- Whitlow R. (1994). "*Fundamentos de mecánica de suelos*". SECSA.
- Whittaker B. N. and Reddis D. J. (1989). "*Subsidence: occurrence, prediction and control*". Elsevier.
- Zeevaert W. L. (1995). "*Esfuerzo-deformación-tiempo en suelos finos no saturados*" Revista de la SMMS, Número 9, Enero-Junio 1995.
- Zepeda G. J. A. (1995) "*Notas del curso de Comportamiento de Suelos I*" DEPMI de la UAQ.
- Zepeda G. J. A. (1989) "*Permeabilidad y flujo de agua en suelos parcialmente saturados*". Curso Internacional de mecánica de Suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro (México) y Universidad de Laval (Canadá).
- Zepeda G. J. A. (1989) "*Expansión y compresibilidad de arcillas parcialmente saturadas*". Curso Internacional de mecánica de Suelos arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro (México) y Universidad de Laval (Canadá).

**ANEXO A: PROGRAMA PARA EL CÁLCULO  
DEL ASENTAMIENTO SEGÚN  
DECLINACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO.**

```

0 CLS
0 OPEN "SCRN:" FOR OUTPUT AS 1
0 PRINT:PRINT:PRINT
0 PRINT "*****"
0 PRINT "*** PROGRAMA PARA DETERMINAR DISTRIBUCION DE ABATIMIENTOS **"
0 PRINT "*** SEGUN POSICION DE POZOS, CAUDAL DE EXTRACCION Y REGIMEN **"
0 PRINT "*** DE OPERACION; CON LA DISTRIBUCION ESPACIAL DE ABATIMIENTOS **"
0 PRINT "*** ASI COMO EL INCREMENTO DE ESFUERZO EFECTIVO (DS), SE **"
0 PRINT "*** DETERMINA LA MAGNITUD DEL HUNDIMIENTO LOCAL EN EL AREA DE **"
00 PRINT "*** INTERES; SERVIR PARA RESTRINGIR PERMISOS DE CONSTRUCCION **"
10 PRINT "*****"
20 PRINT "*** ALGORITMO NUMERICO POR JAMES M. KING, PH. D EN HIDROGEOLOGIA **"
30 PRINT "*** ADECUACION Y ALGORITMO EN GEOTECNIA ALFONSO ALVAREZ MANILLA A **"
40 PRINT "*** SU USO ES PARA CALCULAR DEFORMACIONES EN ROCA O GRANULARES **"
50 PRINT "*** SI ES EN ROCA SE DEBE COCONER EL ESPESOR DE LA JUNTA Y EL **"
60 PRINT "*** NUMERO DE JUNTAS POR UNIDAD DE LONGITUD. **"
70 PRINT "*** PROGRAMACION EN BASIC ASESRDO POR J. CUAUHTEMOC ORENDAIN MUNGUIA*"
80 PRINT "*** M.C. EN COMPUTACION APLICADA. UNIVERSIDAD DE ROTTERDAM, HOLANDA **"
90 PRINT "*****"
00 FOR I=1 TO 300000! : NEXT I : I= 0 : CLS
10 REM *** VARIABLES:
20 REM *** Z(1,C), Z(2,C) : COORDENADAS DE LOS POZOS
30 REM *** Z(3,C) : VELOCIDADES DE BOMBEO (GPM)
40 REM *** Z(4,C) : RADIO
50 REM *** RQ(M) : ESPACIAMIENTO ENTRE RENGLONES (metros)
60 REM *** CQ(P) : ESPACIAMIENTO ENTRE COLUMNAS (metros)
70 REM *** A$ : TITULO DE LA SIMULACION
80 REM *** DAT$ : FECHA DE LA SIMULACION
90 REM *** R : NUMERO DE RENGLONES
00 REM *** CL : NUMERO DE COLUMNAS
10 REM *** S : ALMACENAMIENTO
20 REM *** T : TRANSMISIBILIDAD
30 REM *** TM : LONGITUD PERIODO DE BOMBEO (DIAS)
40 REM *** NW : NUMERO DE POZOS
50 REM *** NW : NUMERO DE POZOS
60 REM *** RD : DISTANCIA RADIAL
70 REM *** DD : ABATIMIENTO EN LA SUPERFICIE POTENCIOMETRICA
80 REM *** WU : INTEGRAL EXPONENCIAL
90 REM *** Ds : INCREMENTO DEL ESFUERZO EFECTIVO (t/m2)
00 REM *** B : ANCHO DE LA JUNTA, DIACLASA O FRACTURA (m)
10 REM *** N : NØMERO DE JUNTA
20 REM *** EI : RELACION DE VACIOS INICIAL
30 REM *** AV : COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD (m2/t)
40 REM *** DH : ASENTAMIENTO SEGUN ABATIMIENTO (metros)
50 REM
60 REM ***** INICIO DEL PROGRAMA *****
70 REM
80 REM
90 REM ***** CAPTURA VARIABLES INICIALES *****
00 REM
10 XX = 0
0 CLS: INPUT "Anote el Tìtulo de la Simulaciòn: ";A$:PRINT
0 INPUT "Anote la fecha de hoy (Sin comas, por favor): ";DAT$:PRINT
0 PRINT "Anote el Incremento de esfuerzo efectivo (t/m2) y coeficiente"
0 INPUT "de compresibilidad (m2/t), (DS, AV)";DS,ALFA:PRINT
0 INPUT "Anote el coeficiente de compresibilidad del agua(m2/kg)";BETA:PRINT
0 INPUT "ANOTE N Y EL VALOR DE B(METROS/METRO); NP=NB)";N,B:PRINT
0 INPUT "Anote el valor de la relación de vacíos inicial (e0)";E0:PRINT
0 INPUT "Anote el número de Renclones ";R:PRINT
0 INPUT "Anote el número de Columnas ";CL:PRINT

```

```

00 PRINT "Anote los espaciamento entre renglones (metros): "
10 FOR I=1 TO R-1: INPUT RQ(I): NEXT I: PRINT
20 PRINT "Anote los espaciamento entre columnas (metros): "
30 FOR I=1 TO CL-1: INPUT CQ(I): NEXT I: PRINT
40 PRINT "Anote el Almacenamiento (adimensional) y la"
50 INPUT "Transmisibilidad en (m2/día), (S, T) ";S,T : PRINT
60 PRINT "Anote la longitud del período de bombeo (Días) y el número de ";
70 INPUT "pozos (Tiempo,No.)";TM,NW: PRINT
80 PRINT "Anote las coordenadas de la cuadrícula, Velocidad de"
90 PRINT "Bombeo (m3/día) y los Radios (metros) de cada pozo (R, C, Q, RAD):"
00 FOR C=1 TO NW
10     INPUT Z(1,C),Z(2,C),Z(3,C),Z(4,C):NEXT C
20 PRINT: PRINT:PRINT
30 INPUT "Desea guardar sus resultados en disco (s/n) : ";DC$
40 IF DC$ <> "s" AND DC$ <> "S" AND DC$ <> "n" AND DC$ <> "N" THEN 730
50 IF (DC$ = "s" OR DC$ = "S") AND (XX=0) THEN INPUT "Nombre del archivo de res
ltados en disco : ";NM$: NM$=NM$+".TXT" : OPEN NM$ FOR OUTPUT AS 2
60 PRINT : PRINT : PRINT
70 INPUT "Resultados en Pantalla o Impresora (P/I) : ";RT$
80 IF RT$ <> "p" AND RT$ <> "P" AND RT$ <> "i" AND RT$ <> "I" THEN 770
90 IF RT$ = "i" OR RT$ = "I" THEN CLOSE#1:OPEN "lpt1:" FOR OUTPUT AS 1
00 REM
10 REM *****      INICIAN CALCULOS      *****
20 REM
30 ST=S/(TM*T) : TQ=1/T
40 CLS:PRINT :PRINT :PRINT :PRINT
50 PRINT TAB(16) "*-*-* Espere un momento *-*-*"
60 REM
70 REM ***          INICIA CALCULOS POR POZO          ***
80 REM
90 FOR C=1 TO NW
00     REM
10     REM ***          CALCULA DISTANCIAS RADIALES          ***
20     REM
30     FOR I=1 TO R: DR=0
40         IF I=Z(1,C) THEN 970
50         MI=Z(1,C):Q1=I-1
60         FOR L=MI TO Q1: DR=DR+RQ(L):NEXT L
70         FOR J=1 TO CL:DC=0
80             IF J=Z(2,C) THEN 1010
90             IF J<Z(2,C) THEN Q2=Z(2,C)-1:NI=J:GOTO 1000
000            NI=Z(2,C): Q2=J-1
010            RD=SQR(DR^2+DC^2) : REM *** CALCULA DISTANCIA POR EL TEOREMA DE PI
AGORAS
020            IF RD=0 THEN RD=Z(4,C)
030 REM
040 REM ***          CALCULOS FINALES
050 REM
060            U=ST*RD^2 : REM *** ARGUMENTO DE LA INTEGRAL EXPONENCIAL
070            DD=TQ*Z(3,C)*WU : REM *** CALCULA EL ABATIMIENTO DE LA SUPERFICIE
EZOMETRICA
080            PORE=E0/(1+E0) : REM *** CALCULO DE ASENTAMIENTOS PROBABLES
090            MV=(1-PORE)*ALFA+BETA*PORE
000            DDD=MV*TQ*Z(3,C)*WU : REM *** CALCULA EL ASENTAMIENTO DEL INTERVAL
DRENADO
10            A(I,J)=A(I,J)+DD : REM *** VALORES DE ABATIMIENTO POR RENGLON USAND
VALOR DE ASENTAMIENTOS PROBABLES
20            AA(I,J)=AA(I,J)+DDD : REM *** VALORES DE ABATIMIENTO POR RENGLON
30            NEXT J
40            NEXT I

```

```

1150 NEXT C
1160 REM
1170 REM -----Subrutina de Impresión -----
1180 REM
1190 CLS:PRINT#1,"Fecha: ";DAT$: PRINT#1,: PRINT#1,:PRINT#1,"Proyecto: ";A$
1200 PRINT#1,: PRINT#1,: PRINT#1,
1210 PRINT#1,TAB(5) "Incremento de esfuerzo efectivo (t/m2): ";DS
1220 PRINT#1,TAB(5) "Coeficiente de compresibilidad (m2/t): ";AV
1230 PRINT#1,TAB(5) "N = ";N;TAB(35) "B = ";B
1240 PRINT#1,TAB(5) "Relacion de vacios inicial : ";EI
1250 PRINT#1,TAB(5) "Numero de renglones: ";R;TAB(35) "Numero de columnas: ";C
1260 PRINT#1,:PRINT#1,
1270 PRINT#1,TAB(5) "Espaciamiento entre renglones:":PRINT#1,
1280 PRINT#1,TAB(10) "Renglon";TAB(35) "Espaciamiento";TAB(35) "Columnas":PRI
1290 FOR I=1 TO R-1:PRINT#1,TAB(13) I;TAB(40) RQ(I);TAB(40) CQ(I):NEXT I:PRIN
1300 PRINT#1,TAB(5) "Espaciamiento entre columnas:":PRINT#1,
1310 PRINT#1,TAB(10) "Columna";TAB(35) "Espaciamiento":PRINT#1,
1320 FOR I=1 TO CL-1:PRINT#1,TAB(13) I;TAB(40) CQ(I):NEXT I:PRINT#1,
1330 PRINT#1,TAB(5) "Longitud del periodo de bombeo (dias): ";TM
1340 PRINT#1,:PRINT#1,TAB(5) "No. de Pozo";TAB(20) "Coord. de cuadrícula";TAB
1350 "Vel. de Bombeo";TAB(65) "RADIOS":PRINT#1,
1360 FOR C=1 TO NW:PRINT#1,TAB(9) C;TAB(30) Z(1,C);", ";Z(2,C);TAB(48) Z(3,C);
1370 TAB(67) Z(4,C):NEXT C:PRINT#1,
1380 PRINT#1,TAB(11) "Coeficiente de Almacenamiento = ";S
1390 PRINT#1,TAB(11) "Transmisibilidad = ";T
1400 PRINT#1,TAB(11) "No. de pozos = ";NW:PRINT#1,:PRINT#1,: PRINT#1,
1410 IF RT$ = "i" OR RT$ = "I" THEN 1410
1420 PRINT "Oprima cualquier tecla para continuar....."
1430 PRINT#1,"Abatimiento total (metros) después de ";TM;" días"
1440 PRINT#1,"de bombeo sin recuperación en el nivel estático"
1450 PRINT#1,"por falta de recarga en el acuífero en la zona"
1460 PRINT#1," de *Proyecto* "
1470 PRINT#1,
1480 FOR I=1 TO R
1490 PRINT#1," Renglon No.":PRINT#1,USING "##";I
1500 FOR J=1 TO CL
1510 PRINT#1,TAB(J*8+7) USING "####.##";A(I,J);
1520 NEXT J:PRINT#1,
1530 NEXT I
1540 PRINT "Oprima cualquier tecla para continuar....."
1550 D$=INKEY$: IF D$="" GOTO 1530 ELSE CLS
1560 PRINT#1,:PRINT#1,:PRINT#1,"Resultado de los asentamientos probables"
1570 PRINT#1,:PRINT#1,
1580 FOR I=1 TO R
1590 PRINT#1," Renglon No.":PRINT#1,USING "##";I
1600 FOR J=1 TO CL
1610 PRINT#1,TAB(J*8+7) USING "####.##";AA(I,J);
1620 NEXT J:PRINT#1,
1630 NEXT I
1640 IF RT$ = "i" OR RT$ = "I" THEN PRINT#1,CHR$(12)
1650 IF DC$ = "s" OR DC$ = "S" THEN GOSUB 1880
1660 PRINT#1,:PRINT "Desea procesar otra Simulación de hundimiento ? (S/N): "
1670 REM *** LIMPIA VARIABLES ***
1680 D$=INKEY$:IF D$="" GOTO 1660
1690 CLS:IF D$="S" OR D$="s" THEN CLOSE#1:OPEN "SCRN:" FOR OUTPUT AS 1: GOTO
1700
1710 REM

```

```

90 PRINT :PRINT "      ***** Programa Terminado, Gracias por su uso. *****"
00 REM
10 FOR S=1 TO 5000:NEXT S
20 CLS
30 CLOSE#1 : CLOSE#2
40 END
50 REM
60 REM -----Subrutina de Cálculo de Exponencial Integral -----
70 REM
80 REM ***      U : ARGUMENTO PROVENIENTE DEL PROGRAMA PRINCIPAL
90 REM
00 IF U>10 OR U<0 THEN WU=0:RETURN
10 IF U<=.01 THEN WU=TY:RETURN
20 IF U<1! THEN 1900
30 E=2.718281828#
40 REM
50 REM *** DETERMINA VALOR DE LA INTEGRAL EXPONENCIAL -WU-
60 REM
70 WU=(U*(8.6347608925#+U*(U*(8.5733287401#+U)))*(3.9584969228#+U*(U*(25.63295
486#+U*(9.5733223454#+U))))):
80 REM
90 REM *** SUBROUTINA PARA GUARDAR DATOS EN DISCO ***
00 REM
10 PRINT#2,"Fecha: ";DAT$: PRINT#2,: PRINT#2,:PRINT#2,"Proyecto: ";A$
20 PRINT#2,: PRINT#2,: PRINT#2,
30 PRINT#2,TAB(5) "Incremento de esfuerzo efectivo (t/m2): ";DS
40 PRINT#2,TAB(5) "Coeficiente de compresibilidad (m2/t): ";AV
50 PRINT#2,TAB(5) "N = ";N;TAB(35) "B = ";B
50 PRINT#2,TAB(5) "Relacion de vacios inicial : ";E0
70 PRINT#2,TAB(5) "Numero de renglones: ";R;TAB(35) "Numero de columnas:";CL
80 PRINT#2,:PRINT#2,
90 PRINT#2,TAB(5) "Espaciamiento entre renglones:";PRINT#2,
00 PRINT#2,TAB(10) "Renglon";TAB(35) "Espaciamiento";PRINT#2,
10 PRINT#2,TAB(5) "Longitud del periodo de bombeo (días): ";TM
20 PRINT#2,:PRINT#2,TAB(5) "Pozo";TAB(20) "Cd";TAB(45) "Bombeo";TAB(65)
30 FOR C=1 TO NW:PRINT#2,TAB(9) C;TAB(30) Z(1,C);", ";Z(2,C);TAB(48) Z(3,C);
3(67) Z(4,C):NEXT C:PRINT#2,
40 PRINT#2,TAB(11) "Coeficiente de Almacenamiento = ";S
50 PRINT#2,TAB(11) "Transmisibilidad = ";T
50 PRINT#2,TAB(11) "No. de pozos = ";NW:PRINT#2,:PRINT#2,: PRINT#2,
70 PRINT#2,"Asentamiento total (metros) después de ";TM;" días"
80 PRINT#2,"de bombeo sin recuperación en el nivel estático"
90 PRINT#2,"o sin recarga en el acuífero en la zona de "
00 PRINT#2,"*Proyecto*"
0 PRINT#2,
0 FOR I=1 TO R
0 PRINT#2," Renglon No.";:PRINT#2,USING "##";I
0 FOR J=1 TO CL
0 PRINT#2,TAB(J*8+7)
0 NEXT J:PRINT#2,
0 NEXT I
0 PRINT#2,:PRINT#2,:PRINT#2,"Resultados con Asentamientos probables"
0 PRINT#2,:PRINT#2,
0 FOR I=1 TO R
0 PRINT#2," Renglon No.";:PRINT#2,USING "##";I
0 PRINT#2,TAB(J*8+7) USING "####.##";AA(I,J);
0 NEXT J:PRINT#2,
0 NEXT I
0 RETURN

```

**ANEXO B: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE HUNDIMIENTO ( m )  
PARA LOS PERÍODOS DE ESFUERZO: 365, 730, 1095,  
1460, 1825, 2190, 2555, 2920 Y 3285 DÍAS.**



Fecha: 365 días de bombeo  
 Proyecto: Mecanismo de Agrietamiento en el Valle  
 y Zona Metropolitana de Querétaro

Asentamiento ( metros )por el Abatimiento (metros) después de 365 días de bombeo sin recuperación en el nivel estático.

R. 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R. 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
R. 3	0.00	0.05	0.00	0.01	0.10	0.14	0.01	0.00
R. 4	0.00	0.04	0.07	0.08	0.11	0.18	0.14	0.01
R. 5	0.00	0.04	0.08	0.09	0.01	0.17	0.17	0.01
R. 6	0.00	0.00	0.04	0.01	0.06	0.11	0.18	0.01
R. 7	0.00	0.00	0.05	0.04	0.05	0.02	0.27	0.00
R. 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.12	0.00

Fecha: 730 Ddías de bombeo

Asentamiento ( metros )por Abatimiento (metros ) después de 730 días de bombeo sin recuperación del nivel estático.

R. 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R. 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
R. 3	0.00	0.06	0.01	0.02	0.11	0.16	0.03	0.00
R. 4	0.00	0.04	0.08	0.09	0.13	0.22	0.17	0.01
R. 5	0.00	0.04	0.09	0.10	0.02	0.20	0.20	0.01
R. 6	0.00	0.00	0.04	0.01	0.07	0.14	0.21	0.02
R. 7	0.00	0.00	0.05	0.05	0.06	0.04	0.31	0.01
R. 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00

Fecha: 1095 días de bombeo  
 Proyecto: Mecanismo de Agrietamiento en el Valle  
 y Zona Metropolitana de Querétaro

Asentamiento ( metros )por Abatimiento (metros) después de 1095 días de bombeo sin recuperación del nivel estático.

R. 1								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R. 2								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00
R. 3								
	0.00	0.07	0.01	0.03	0.13	0.20	0.05	0.01
R. 4								
	0.00	0.05	0.10	0.11	0.16	0.26	0.21	0.02
R. 5								
	0.00	0.05	0.11	0.13	0.03	0.25	0.24	0.02
R. 6								
	0.00	0.00	0.05	0.02	0.09	0.17	0.26	0.03
R. 7								
	0.00	0.00	0.06	0.06	0.08	0.06	0.36	0.02
R. 8								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00

Fecha: 1460 días de bombeo

Asentamiento ( metros )por Abatimiento (metros) después de 1460 días de bombeo sin recuperación en el nivel estático.

R. 1	C.1							
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
R. 2								
	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.13	0.02	0.01
R. 3								
	0.01	0.22	0.06	0.11	0.42	0.62	0.18	0.04
R. 4								
	0.01	0.17	0.31	0.36	0.50	0.82	0.66	0.08
R. 5								
	0.00	0.17	0.33	0.40	0.13	0.77	0.75	0.09
R. 6								
	0.00	0.02	0.17	0.08	0.28	0.54	0.80	0.10
R. 7								
	0.00	0.01	0.19	0.18	0.24	0.21	1.09	0.07
R. 8								
	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.07	0.01

Fecha: 1825 días de bombeo  
 Proyecto: Mecanismo de agrietamiento en el Valle  
 y Zona metropolitana de Querétaro

Asentamiento ( metros )por Abatimiento (metros) después de 1825 días de bombeo sin recuperación en el nivel estático.

R. 1	C.1							
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
R. 2								
	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.16	0.04	0.01
R. 3								
	0.01	0.25	0.08	0.15	0.49	0.72	0.23	0.06
R. 4								
	0.01	0.19	0.36	0.43	0.58	0.94	0.76	0.11
R. 5								
	0.01	0.20	0.38	0.46	0.18	0.89	0.86	0.11
R. 6								
	0.00	0.02	0.20	0.11	0.32	0.59	0.82	0.11
R. 7								
	0.00	0.02	0.22	0.21	0.28	0.21	0.63	0.07
R. 8								
	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.08	0.01

Fecha: 2190 días de bombeo

Asentamiento ( metros )Abatimiento (metros) después de 2190 días de bombeo sin recuperación del nivel estático.

R. 1	C.1							
	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00
R. 2								
	0.00	0.01	0.01	0.03	0.04	0.17	0.05	0.02
R. 3								
	0.01	0.25	0.09	0.17	0.51	0.74	0.26	0.08
R. 4								
	0.01	0.20	0.37	0.45	0.61	0.97	0.79	0.14
R. 5								
	0.01	0.20	0.39	0.48	0.21	0.93	0.90	0.15
R. 6								
	0.00	0.03	0.20	0.13	0.35	0.67	0.93	0.16
R. 7								
	0.00	0.02	0.23	0.23	0.30	0.30	1.23	0.12
R. 8								
	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.08	0.09	0.02

Fecha: 2555 días de bombeo  
 Proyecto: Mecanismo de Agrietamiento en el Valle  
 y Zona Metropolitana de Querétaro

Asentamiento ( metros ) por Abatimiento (metros) después de 2555 días de bombeo sin recuperación en el nivel estático.

R. 1	C.1							
	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
R. 2	0.00	0.02	0.02	0.04	0.05	0.18	0.06	0.02
R. 3	0.01	0.26	0.11	0.20	0.54	0.78	0.30	0.10
R. 4	0.02	0.21	0.39	0.48	0.64	1.01	0.83	0.16
R. 5	0.01	0.21	0.41	0.51	0.24	0.97	0.94	0.18
R. 6	0.01	0.04	0.22	0.14	0.18	0.67	0.91	0.16
R. 7	0.00	0.03	0.24	0.25	0.51	0.30	0.91	0.12
R. 8	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.08	0.09	0.02

Fecha: 2920 días de bombeo

Asentamiento ( metros ) por Abatimiento (metros) después de 2920 días de bombeo sin recuperación en el nivel estático.

R. 1	C.1							
	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01
R. 2	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.20	0.08	0.03
R. 3	0.02	0.28	0.13	0.23	0.56	0.84	0.34	0.12
R. 4	0.02	0.23	0.42	0.52	0.69	1.09	0.90	0.19
R. 5	0.02	0.23	0.44	0.56	0.29	1.06	1.02	0.22
R. 6	0.01	0.05	0.24	0.18	0.42	0.77	1.05	0.22
R. 7	0.01	0.04	0.26	0.27	0.36	0.38	1.34	0.17
R. 8	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.10	0.11	0.03

## LISTA DE SÍMBOLOS:

- $a^*_v$ : coeficiente de compresibilidad.  
 $A$ : área por donde pasa un flujo de agua.  
 $B$ : espesor saturado.  
 $c$ : cohesión.  
 $C$ : columna.  
 $D/2$ : radio del pozo de extracción.  
 $D$ : salida de agua del sistema acuífero a través de manantiales.  
 $du$ : pequeña variación de la presión de poro.  
 $d\sigma$ : pequeña variación del esfuerzo total.  
 $d\sigma^e$ : pequeña variación del esfuerzo efectivo.  
 $e$ : relación de vacíos.  
 $E_s$ : entradas de agua por flujo subterráneo al sistema acuífero.  
 $E_v$ : evapotranspiración.  
 $E_x$ : extracción de agua subterránea mediante pozos.  
 $G_w$ : grado de saturación.  
 $h$ : carga hidráulica.  
 $H$ : espesor del acuífero.  
 $i$ : gradiente hidráulico.  
 $i$ : renglón iésimo.  
 $J$ : vector de flujo de masa  $J = (J_x, J_y, J_z)$ .  
 $j$ : columna jotaésima.  
 $K_{x,y,z}$ : permeabilidad en las direcciones x, y, z.  
 $m$ : pozo emésimo.  
 $n$ : porosidad.  
 $NE$ : Nivel Estático.  
 $Q$ : caudal de extracción en el campo de pozos.  
 $r$ : distancia del punto de observación al pozo de extracción.  
 $R$ : renglón.  
 $R_v$ : recarga vertical (lluvia) del sistema acuífero.  
 $s$ : declinación del nivel estático.  
 $S$ : coeficiente de almacenamiento  
 $S_s$ : salidas por flujo subterráneo del sistema acuífero.  
 $S_s$ : peso específico relativo de sólidos.  
 $T$ : transmisibilidad de la formación acuífera.  
 $t_i$ : tiempo, estado del sistema acuífero según posición del nivel estático.  
 $u$ : presión de poro.  
 $U(\%)$ : grado de consolidación o compresibilidad.  
 $V$ : volumen de la masa de la sustancia.  
 $\mathbf{v}$ : vector velocidad  $\mathbf{v} = (\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ .

VER: volumen elemental representativo =  $dx dy dz$ .  
 $V_m$ : volumen de la masa.  
 $V_v$ : volumen de vacíos.  
 $W(\phi)$ : Función de Pozo.  
 $w$ : humedad natural.  
 $x, y, z$  direcciones de ejes coordenados ortogonales.  
 $\Delta\delta H$ : asentamiento parcial debido al abatimiento  $s$  en un intervalo de tiempo.  
 $\Delta V$ : cambio de almacenamiento en el sistema acuífero.  
 $\Delta\delta$ : espesor deformado por drenado del agua subterránea.  
 $\Sigma E$ : entradas de agua al sistema acuífero.  
 $\Sigma S$ : salidas de agua subterránea del sistema acuífero.  
 $\beta$ : compresibilidad del agua.  
 $\phi$ : ángulo de fricción interna.  
 $\gamma_m$ : peso específico de la masa del suelo.  
 $\gamma_s$ : peso específico de sólidos.  
 $\phi$ : variable sin dimensiones que envuelve a  $S, r, T$  y  $\Gamma$ .  
 $\rho$ : densidad.  
 $\sigma$ : esfuerzo total.  
 $\sigma'$ : esfuerzo efectivo.  
 $\tau$ : resistencia al esfuerzo cortante.

## SIMBOLGÍA PARA LAS ERAS Y UNIDADES GEOLÓGICAS:

Qal: Reciente, aluviones.  
 TQbc: Terciario Cuaternario, basalto y andesita de la Unidad Cimatario.  
 Tsth: Terciario Superior, tobas de la Unidad Hércules.  
 Tstcc: Terciario Superior, tobas (arenas de pómez) de la Unidad Cuesta China.  
 Tmbm: Terciario Medio, basalto de la Unidad Menchaca.  
 Titm: Terciario Inferior, tobas de la Unidad Mompaní.  
 Tibsp: Terciario Inferior, basalto y andesita de la Unidad San pedrito.  
 Tij: Terciario Inferior, cuerpos intrusivos de la Unidad Juriquilla.  
 Kss: Cretáceo superior; Formación de rocas sedimentarias marinas.

