

01/31
19



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**MODELO EVOLUTIVO DEL ACUIFERO
DEL VALLE DE PUEBLA**

T E S I S
QUE PARA PRESENTAR EL TITULO DE
I N G E N I E R O G E O F I S I C O
P R E S E N T A :
D A N I E L S I L V A P E R E Z

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ELSA LETICIA FLORES MARQUEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F., OCTUBRE DE 2003



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



GOBIERNO FEDERAL
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-1-842

SR. DANIEL SILVA PÉREZ
Presente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Elsa Leticia Flores Márquez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

MODELO EVOLUTIVO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA

- RESUMEN
- INTRODUCCIÓN
- I GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA DE LA CUENCA DE PUEBLA
- II ESTUDIOS GEOFÍSICOS PREVIOS
- III SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES DE FLUJO Y TRANSPORTE
- IV MODELO DE FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO
- V CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 18 de agosto de 2003
EL DIRECTOR

M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFR*JAGC*gtg

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la bella Universidad Nacional Autónoma de México por haberme aceptado en su aposento y con ello, atenuar mi elemento racional de bellaco, villano, malmirado, descompuesto, ignorante, infacundo, deslenguado, atrevido, murmurador y maldiciente. Además que nunca la decepcionare.

Mi gratitud a la Facultad de Ingeniería que me proporcionó los fundamentos para obtener la condición de profesionista.

Agradezco a la Dra. Elsa Leticia Flores Márquez por su confianza, apoyo y tiempo.

A todos los profesores un sincero reconocimiento por sus enseñanzas, y que las más de las veces procurare emular.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DEDICATORIAS

Carmen: Te doy las gracias por el amor que siempre me brindas. No fue infructuoso el soportar y afrontar tantas quejas de mi parte, por exceso de buen comportamiento

Agustín: Creó que fue incierto el augurio 'lo vas a echar a perder', que como muchos te comentaban. Síguete conduciendo como el señor Fiodor Karamazov.

A ambos agradezco haberme mandado a la escuela.

A la estirpe, constituida por Juan, David, Nati, Agustín, Sara, Vicente, Josué, Carmen, Alberto (los Buendía). Que placentero es ser parte de esta familia, su influencia moldearon gran parte de mi carácter y personalidad. Les manifiesto mi beneplácito al decirme que soy adoptado ó recogido. Reitero y les ofrezco un cabal afecto bla. bla. bla y ya saben.

También a Guillermo, Leticia y los que me falten.

A mi Dulcinea por encontrarnos sin buscarnos, existe y creó que su nombre es Chayo.

Ricardo, Moisés, Sergio y otros más: Amigos con los que disfruto y comparto momentos de alegría jolgorio. Y que saben que no sólo paso los días en el desmadre.

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I	GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA DE LA CUENCA DE PUEBLA	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Metodología	1
1.3	Localización del área de estudio	2
1.4	Fisiografía	2
1.4.1	Faja volcánica transmexicana	4
1.4.2	Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac	4
1.5	El escenario Geológico	5
1.6	Estratigrafía de la Cuenca de Puebla	6
1.7	Geología Estructural	8
1.8	Sistema Acuífero Del Valle De Puebla	9
1.8.1	Escurrimiento Superficial	9
1.8.2	Condiciones Geohidrológicas	11
1.8.3	Zona de recarga	14
1.8.4	Zona de descarga	15
1.8.5	Nivel estático	15
1.8.6	Abatimiento de los Niveles Piezométricos	17
1.9	Balance de Aguas Subterráneas	22
CAPÍTULO II	ESTUDIOS GEOFISÍCOS PREVIOS	25
2.1	Prospección eléctrica en el Valle de Puebla	25
2.2	Descripción de las unidades geoeléctricas en la ciudad de Puebla	25
2.3	Descripción de las unidades geoeléctricas en el Valle de Puebla	26
2.3.1	Generalidades	26
2.3.2	Localización de la zona de Xoxtla	26
2.3.3	Localización del área de Barranca Honda	32
2.4	Conclusiones	36

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO III SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES DE FLUJO Y TRANSPORTE	37
3.1 Introducción	37
3.2 Evolución de los modelos de transporte	37
3.3 Formulación Euler-Lagrange de la ecuación de flujo	38
3.4 Breve historia del MODFLOW	39
3.4.1 Método	40
3.6.2 Visual MODFLOW	40
CAPÍTULO IV MODELO DE FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO	43
4.1 Características del modelo	
4.2 Geometría del Acuífero	43
4.3 Definición de las capas (estratos) del modelo	44
4.4 Tipo y orientación de la malla	44
4.5 Asignación de los parámetros a las celdas (nodos) del modelo	45
4.5.1 Conductividad hidráulica	46
4.5.2 Recarga	46
4.5.3 Carga hidráulica	47
4.5.4 El bombeo	52
4.5.5 Condiciones de frontera	54
4.6 Calibración	56
4.7 Escenarios	57
4.8 Resultados	64
CAPÍTULO V CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	67
APÉNDICE 1	70

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio

Figura 1.2 Columna estratigráfica para la cuenca de Puebla
reconstruida de la sección 1.5 y 1.6

Figura 1.3 Hidrología superficial del área, acuífero Valle de Puebla

Figura 1.4 Curvas de igual elevación del nivel estático
junio - julio de 1973

Figura 1.5 Curvas de igual elevación del nivel estático
octubre - noviembre de 1980

Figura 1.6 Curvas de igual elevación del nivel estático
noviembre de 1996

Figura 1.7 Abatimiento para los años de 73 a 80

Figura 1.8 Abatimiento para los años de 73 a 96

Capítulo II

Figura 2.1 Ubicación de las Pseudosecciones Geoeléctricas
en la zona de Xoxtla

Figura 2.2 Sección Geoeléctrica A-A'

Figura 2.3 Ubicación de las Pseudosecciones Geoeléctricas en la
zona de Barranca Honda

Figura 2.4 Sección Geoeléctrica B-B' y C-C'.

Capítulo IV

Figura 4.1 Delimitación del acuífero Valle de Puebla, modificado de
"Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla" (SARH, 1992)

Figura 4.2 Celdas activas en blanco, celdas inactivas en color verde

Figura 4.3 Renglones y columnas elegidos para mostrar su correspondiente sección.

Figura 4.2a Renglón número 17

Figura 4.2b Renglón número 27

Figura 4.2c Renglón número 39

Figura 4.2d Renglón número 44

Figura 4.2e Columna número 20

Figura 4.2f Columna número 31

Figura 4.2g Columna número 44

Figura 4.2h Columna número 53

Figura 4.4 Discretización para la carga hidráulica para el año 1996

Figura 4.5 Discretización para la conductividad hidráulica

Figura 4.6 Ubicación de pozos de bombeo en el Valle de Puebla, modificado de 'Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla' (SARH, 1992).

Figura 4.7 Condiciones de frontera y pozos de bombeo emplazados

Figura 4.8 Incorporación al modelo de pozos

Figura 4.9 Configuración del modelo para estado estacionario

Figura 4.10 Configuración del modelo para estado transitorio (2555 días) año 1980

Figura 4.11 Configuración del modelo para estado transitorio (8760 días) año 1997

Figura 4.12 Correlación entre niveles calculados y observados para los pozos de calibración para el año 1980

Figura 4.13 Correlación entre niveles calculados y observados para los pozos de calibración para el año 1997

Figura 4.14 Configuración de la elevación del nivel estático para el año 2007

Figura 4.14a sección del renglón 143

Figura 4.14b sección de la columna 137

LISTA DE CUADROS

Capítulo I

Cuadro 2.4 Censo de aprovechamientos de agua subterránea realizado en 1996-1997 tipo y uso a que se destinan sus aguas

Cuadro 2.5 Estimación de los volúmenes de extracción anuales en m^3

Cuadro 2.6 Balance de aguas subterránea, Valle de Puebla. Valores Mm^3 anuales

Cuadro 2.7 Balance de aguas subterráneas valores Mm^3 anuales 1997.

Capítulo II

Cuadro 2.1 Unidades Geoelectricas en: A-A', B-B', y C-C'

Cuadro 2.2 Unidades Geoelectricas en: A-A', B-B', C-C' D-D', E-E', F-F' y G-G'

Cuadro 2.3 Unidades Geoelectricas en: H-H', I-I', J-J', K-K', y L-L'

Capítulo IV

Cuadro 4.4a Rendimiento específico S_y , Coeficiente de almacenamiento S_s y Porosidad

Cuadro 4.1 Datos de entrada para la condiciones de frontera de carga constante

Cuadro 4.2 Datos de entrada para la condiciones de frontera río

Cuadro 4.5 El balance de aguas subterráneas para el año 2007 (Mm^3)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

El sistema acuífero de la cuenca de Puebla mejor conocido como acuífero del "Valle de Puebla" ha sido explotado, empleando norias, pozos de bombeo, desde el año 1950, para dicha fecha el desarrollo urbano-industrial de las ciudades emplazadas en el valle tales como Puebla, Tlaxcala, San Martín Texmelucan, Cholula, Xoxtla y otras no era desafortunado. Por lo tanto no se presentaba impacto en el acuífero causado por las actividades humanas. No así para la fecha actual, donde la extracción desmedida de agua subterránea ha provocado un considerable abatimiento del nivel estático en la parte sur de la cuenca, y más de ochenta metros en la ciudad de Puebla y sus alrededores.

El presente trabajo exhibe la situación actual del acuífero mediante la elaboración de un modelo de flujo, en base a geológicos y geofísicos de la Cuenca de Puebla.

Para ello se recabaron los estudios previos realizados por la Comisión Nacional del Agua y del Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (SOAPAP). Esta información y la generada por el presente trabajo permitieron, posteriormente integrar un modelo geométrico 3D de los estratos geológicos que conforman al sistema acuífero. Los parámetros de este modelo se incorporaron en el paquete comercial Modflow para describir un modelo numérico. Las condiciones de frontera para este modelo fueron introducidas de acuerdo con las observaciones geohidrológicas.

Inicialmente se realizó un modelo en estado estacionario, después un modelo transitorio para calibrar los datos recabados que corresponden al período de 1996 y por último un modelo a futuro considerando el régimen de explotación actual hasta el año 2007, en los tres casos se obtiene el régimen hidrológico del acuífero.

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo es una contribución para abordar el gran problema del suministro de agua, recurso indispensable para la preservación de la vida. Más del 50% del país afronta un complejo problema originado por la escasez de agua. Las crecientes necesidades de agua han sido satisfechas principalmente del subsuelo.

En la ciudad de Puebla, la demanda de agua de los sectores público-urbano esencialmente, siguen aumentando en la misma proporción en que se incrementa la población. Aunque el acuífero en estudio se encuentra en una cuenca es conocido por los habitantes de la zona como "Valle de Puebla", por esta razón lo referimos en esta tesis como acuífero del "Valle de Puebla". Cuyo interés económico radica en el suministro para la alta actividad agrícola, urbana, comercial e industrial (cuarto lugar en importancia nacional); así también para las demás ciudades.

Se recabaron estudios previos realizados por la Comisión Nacional del Agua y la compañía Geotecnología. La configuración de las isocurvas del nivel estático que describen las condiciones del acuífero para los años 1973, 1980 y 1996, se integro con el balance de aguas subterráneas. La historia piezométrica es fundamental para la generación del modelo numérico. También se recurrió a estudios geofísicos que corroboraran la geometría de las unidades hidrológicas.

El presente trabajo consiste en desarrollar un modelo de flujo evolutivo. Se estudió a la ecuación diferencial que sustenta la modelación matemática de aguas subterráneas, y que resuelve el programa utilizado. La simulación numérica se realiza con el difundido código en Diferencias Finitas MODFLOW, en la versión que integra el paquete informático Visual MODFLOW v.2.81.123 Waterloo Hydrogeology Inc.,1999.

El constante problema de abatimiento del nivel freático, está incluido en los escenarios del modelo y se analiza mediante el balance hídrico, identificando y cuantificando en cada tiempo de cálculo el volumen de agua que entra y sale en el acuífero.

Para lograr el correspondiente modelo del sistema acuífero 'Valle de Puebla' se tienen que analizar las condiciones geohidrológicas, actividad y densidad de los pozos de extracción e incorporar estudios geológicos y de exploración geofísica para conformar y generar un modelo que aproxime el comportamiento del sistema acuífero "Valle de Puebla", y conocer su situación actual, así como inferirla en el futuro. En este trabajo se hizo una estimación del comportamiento para el año 2007.

CAPÍTULO I GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA DE LA CUENCA DE PUEBLA

1.1 Objetivo

Se caracterizará el patrón de flujo evolutivo de agua subterránea del sistema acuífero del "Valle de Puebla", en tres dimensiones por medio del paquete comercial, Visual MODFLOW Versión 2.8.1.123. Para lograr esto se pretenden alcanzar las siguientes metas:

- a) cuantificar las unidades hidrogeológicas y asignarle su respectiva conductividad hidráulica,
- b) identificar y definir las fronteras naturales del flujo de agua subterránea,
- c) conocer el patrón de recarga y descarga, su relación entre el agua superficial y el agua subterránea,
- d) estimar la disponibilidad y advertir efectos causados por sobre-explotación del acuífero, así como proponer un mejor uso y conservación del agua subterránea en el presente y a largo plazo.

1.2 Metodología

La metodología desarrollada en el presente trabajo consistió en:

- i) Recopilación y análisis de la información, hidrológica, geológica, pozos de bombeo, historia piezométrica, zonas urbano-industriales disponible.
- ii) Recabar informe de exploración geofísica
- iii) Estudio de la teoría y solución de la ecuación de flujo y transporte.
- iv) Modelación en tres dimensiones del sistema acuífero para distintos escenarios.

Se realizó la recopilación de informes de perforación de pozos, obteniéndose los cortes estratigráficos de pozos actualmente en explotación, proporcionados por La Comisión Nacional del Agua "CNA" y el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla "SOAPAP", así como los registros de sondeos eléctricos verticales "SEV", y estudios hidrogeológicos del Valle de Puebla proporcionados por la Compañía Geotecnología S.A.

También se recopilaron: la topografía de la región, mapa de las curvas de igual elevación (m.s.n.m.), mapa de la geología superficial, datos sobre corrientes de agua, zonas urbanas, vías de comunicación; obtenidos estos del INEGI, e información que existe en la literatura sobre del tema.

Para realizar el modelo se estudió la teoría concerniente a la solución de las ecuaciones diferenciales de flujo y transporte. Para ello se utilizó el simulador MODFLOW, así como la forma en que se introducen todos los parámetros del sistema acuífero en cuestión, para calcular la solución y la forma de presentar los resultados, es decir la manera en que funciona éste paquete.

Al realizar el modelo del acuífero del "Valle de Puebla" se propusieron dos posibles escenarios; en el primer escenario se propuso un estado estacionario, donde no hay cambio de las condiciones del acuífero respecto del tiempo, por ejemplo en parámetros de carga o descarga, además los pozos de bombeo propuestos se mantienen sin extracción de agua.

En el segundo escenario se aplica un estado transitorio, cuyos parámetros son modificados conforme transcurre el tiempo o en ciertos períodos de tiempo; también se considera la presencia de pozos de bombeo activos.

1.3 Localización del área de estudio

Ya que dos tercios del área que conforma al acuífero "Valle de Puebla" se localizan en el estado de Puebla, y el otro tercio pertenece al estado de Tlaxcala, referimos la ubicación al primero, Puebla limita al norte y este con el estado de Veracruz, al sur con el estado de Oaxaca y Guerrero, y al oeste-noroeste con los estados de Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo.

La zona de estudio (Figura 1.1) modelada comprende las coordenadas UTM (2088600 N, 540200 O) y (2150600 N, 597200 O). La ciudad de Puebla contenida en la zona se localiza en el Altiplano Mexicano a 2162 m.s.n.m. y las siguientes coordenadas UTM 584178, 2106425 ó GEO 19°3' N, 98°12' O. Debido a su producción industrial, actividad comercial y número de habitantes (2.6 millones), la ciudad ocupa el cuarto lugar de importancia para el país.

1.4 Fisiografía

La región en estudio se encuentra en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FTV) formada por grandes sierras volcánicas, coladas lavícas, conos cineríticos, y grandes estratovolcanes. Su formación se inició en el Mioceno (hace 16 millones de años) y su actividad continua en la actualidad (Ferrari et al., 1994). La Faja Volcánica es considerada por varios autores como una provincia calco-alcalina, caracterizada por la abundancia de rocas clasificadas como andesitas y dacitas.

El origen de esta gran Provincia Volcánica, se ha explicado aceptando la teoría de la subducción de la placa de Cocos bajo el continente con diversos ángulos, lo que justifica la no coincidencia entre la orientación de la Trinchera Mesoamericana y este arco Volcánico. El vulcanismo actual se presenta con mayor intensidad hacia el sur de la Faja Volcánica Transmexicana.

Se reconoce gran diversidad de procesos exógenos antiguos y actuales. En toda la extensión de esta provincia, existen lagos actuales y paleolagos con sedimentos antiguos aportados por valles fluviales, glaciares del Pleistoceno tardío y Holoceno.

Las geformas de FVT están condicionadas por la actividad volcánica.

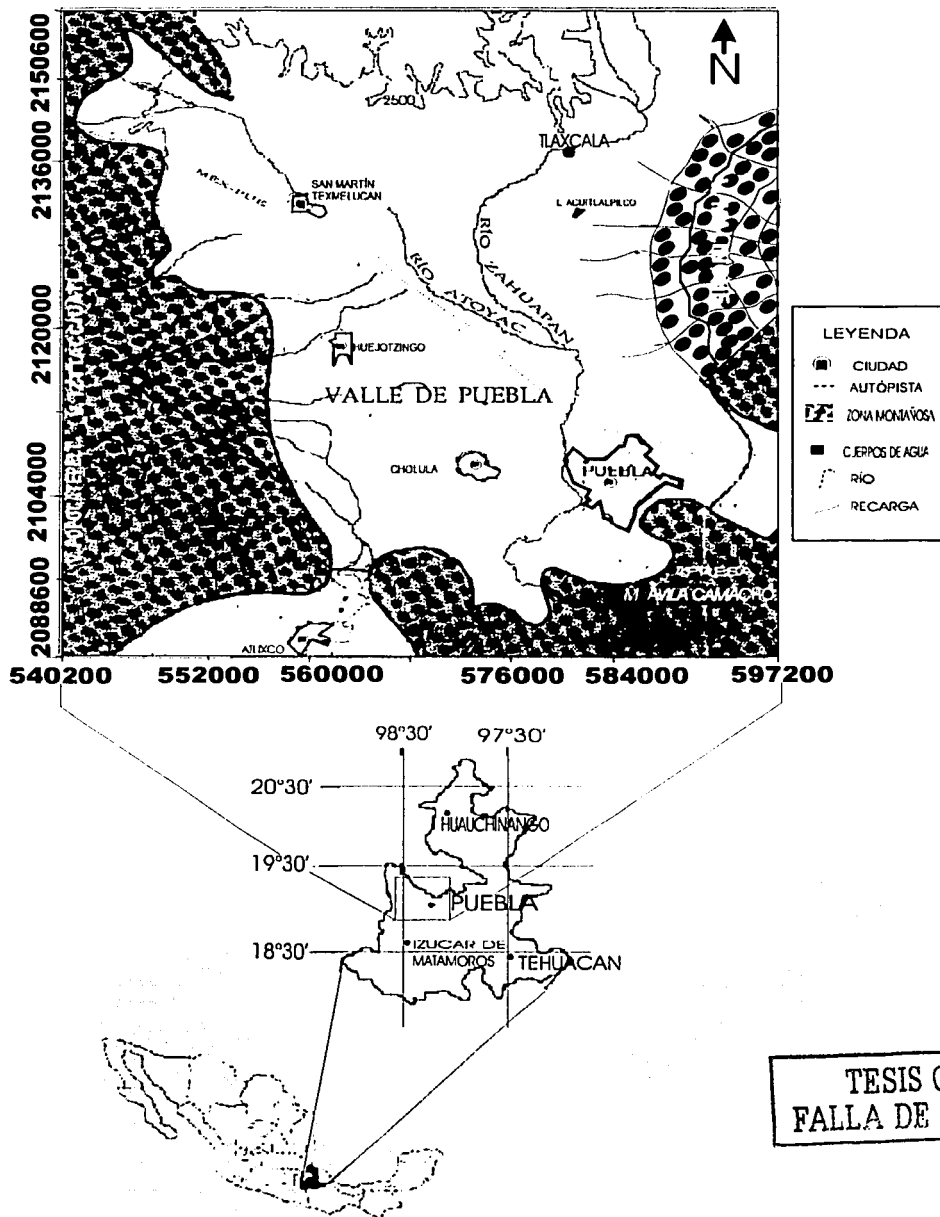


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio.

Los principales aparatos volcánicos que han influido significativamente en la hidrogeología, del área de estudio son los estratovolcanes como el Pico de Orizaba (5639 m.s.n.m.), el Popocatepetl (5542 m.s.n.m.), el Iztaccíhuatl (5386 m.s.n.m) y La Malinche (4461 m.s.n.m.). Dichos volcanes se elevan majestuosamente en medio de las grandes llanuras lacustres de edad Pliocénica (5.3 millones de años) que forman y caracterizan geológicamente la cuenca de Puebla.

1.4.1 Faja Volcánica Transmexicana

Dentro de Puebla se encuentran áreas que forman parte de tres subprovincias de la Faja Volcánica Transmexicana: Lagos y Volcanes de Anáhuac, Chiconquiaco y Llanos y Sierras de Querétaro e Hidalgo; éstas en conjunto abarcan 38.26% del territorio estatal.

1.4.2 Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac

Es la más extensa de las catorce que integran la FVT. En ella quedan comprendidas las ciudades de Puebla, Toluca, Pachuca, Tlaxcala, Cuernavaca y D.F. La subprovincia se extiende de poniente a oriente, aproximadamente 35 Km al occidente de Toluca, y hasta Quimixtlán, Puebla. Consta de sierras volcánicas y grandes estratovolcanes que alternan con amplias llanuras formadas, en su mayoría, por cuencas lacustres. De oeste a este se encuentran en sucesión las cuencas de Toluca, México, Puebla y Oriental.

En el estado de Puebla esta subprovincia es la que abarca mayor superficie, ya que 35.93% de su territorio pertenece a ella. Limita al norte con las subprovincias Carso Huasteco de la Sierra Madre Oriental y Chiconquiaco, de la FVT. Al este se prolonga hacia el estado de Veracruz y al sur colinda con las subprovincias Sierras Orientales, Sur de Puebla, Sierras y Valles Guerrerenses y Llanuras Morelenses, todas éstas son integrantes de la provincia Sierra Madre del Sur. Ocupa casi toda la parte central de la entidad, desde la Sierra Nevada hasta el Pico de Orizaba; también el área de Izúcar de Matamoros y dos franjas que van desde Hueyapan y Ahuazotepec hasta la localidad de Oriental. Comprende 66 municipios completos, algunos de los cuales son: San Pedro Cholula, Tlahuapan, Ahuazotepec, Lafragua, Chignahuapan, Atzitzintla y San Nicolás los Ranchos.

En esta zona se localizan las tres mayores elevaciones del país: Citlaltépetl o Pico de Orizaba, que es compartido con el estado de Veracruz; Popocatepetl, el cual pertenece a los estados de Puebla, México y Morelos, e Iztaccíhuatl, que pertenece a los estados de Puebla y México. En las cumbres de estas elevaciones existen tres de los escasos glaciares de la región intertropical del mundo. También se encuentra el volcán La Malinche. Entre estos estratovolcanes quedan incluidas las cuencas de Puebla y Atlixco-Izúcar, que están interrumpidas y separadas por lomeríos suaves (<http://www.inegi.gob.mx/difusion/espanol/>).

1.5 El Escenario Geológico

La cuenca de Puebla se encuentra entre montañas del Terciario y rodeada de estratovolcanes del Cuaternario así como de montes y cerros de calizas del Cretácico Superior, esta rellena de tobas volcánicas, derrames de lava, conos cineríticos, depósitos lacustre fluviales y material glacio-fluvial re TRABAJADO de las estructuras más altas.

Estos son algunos de los estudios estratigráficos y geológicos de la región (Erffa et., 1976, Salazar-Mandujano, 1970, Vázquez-Sánchez and Jaimes-Palomera, 1989, Moonser et al., 1996). Sin embargo se puede proponer que la cuenca se encuentra entre montañas y descansa sobre un basamento antiguo. En la Sierra del Tentzo, en el sur del área de estudio, existe un importante afloramiento que describe al Complejo Acatlán del Paleozoico. Este complejo esta formado por una reunión unidades tectónico heterogéneo y unidades metamórficas que fluctúan desde esquistos verdes a facies de eclogita (Ortega- Gutiérrez, 1978, 1993). Arenisca continental, esquistos, y caliza marina del Jurásico y del Cretácico Inferior, sobreyacen al complejo Paleozoico (Erffa et al., 1976). Esta secuencia sedimentaria se identifica hacia el sur de la ciudad de Puebla, fuera de la región de estudio, es conformada por rocas sedimentarias del Cretácico Superior, tales como caliza marina con ínter estratificaciones de arenisca y esquistos (Salazar-Mandujano, 1970). Las calizas son de estratos delgados, contienen lentes y nódulos de pedernal oscuro. Estas rocas estaban fuertemente plegadas y fracturadas antes de iniciarse el Terciario y la actividad volcánica del área.

Se deposita un estrato de conglomerado sobre la secuencia sedimentaria del Mesozoico, situado al sur de la región de estudio, el Grupo Balsas es probablemente el primer evento en el periodo Terciario. Este último está compuesto por fragmentos sedimentarios y metamórficos originados de formaciones precedentes (Erffa, 1976). Sobre del grupo Balsas se encuentran derrames de lava y tobas de composición dacítica y riolítica. Mooser et al. (1996) sugiere que el espesor de estas rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno pueden alcanzar más de 1000 m en algunas regiones, y la mayoría de estas son cubiertas por eventos volcánicos más recientes. Solamente hacia el sur de la frontera del área de estudio, pueden ser identificados algunos domos, cuellos de volcanes y conos.

Erffa (1976) y Mooser et al. (1996) proponen la existencia de sedimentación lacustre durante el periodo Plioceno, asociándolo a los resultados de más eventos volcánicos. Un ejemplo de este proceso sedimentario continental es la presencia en los espesores de la estratificación de materiales volcánicos re TRABAJADOS como escoria, ceniza, además fragmentos de vidrio y carbonatos. El afloramiento de estos sedimentos lacustre pueden alcanzar 200 m de espesor y se encuentran hacia la frontera norte de la cuenca de Puebla cerca de la ciudad de Tlaxcala y en algunas regiones hacia el sur de la frontera. Algunos materiales re TRABAJADOS de los eventos de derrames de lava y tobas pueden estar interestratificados.

precámbricos del Macizo Oaxaqueño, el cual contiene evidencias de antiguas orogenias.

- b) Depósitos calcáreos de origen marino del Cretácico. Representa al periodo Cretácico Superior, se conocen como la formación Maltrata, compuesta por estratos densos y gruesos de caliza, también se encuentran margas, areniscas y lutitas. Estos depósitos forman paquetes estratigráficos de aproximadamente 1000 metros de espesor, los cuales debido a esfuerzos tectónicos, formaron plegamientos y cabalgaduras durante la orogenia Laramídica del Eoceno Inferior.
- c) Formación Balsas. Se trata de areniscas, conglomerados y lodolitas arenosas continentales que se originan en el Eoceno superior. Aparecen en forma de rellenos y de abanicos aluviales. Como estos sedimentos se derivan de la erosión de los cuerpos anticlinales laramídicos, abundan los clastos calizos.
- d) Rocas volcánicas del Oligoceno. En la parte superior de este grupo se encuentran derrames lávicos que sobreyacen a secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brecha tobácea y aglomerados. Estos depósitos están, interestratificados con clásticos aluviales de espesor promedio de seis metros, lo que indica una interrupción en la actividad volcánica. La composición varía de andesítica a riódacítica. Los flujos lávicos según el análisis petrográfico son porfiríticos-holocristalinos, con fenocristales de andesita, oligoclasa, cuarzo, augita, e hiperstena, que yacen en una matriz compuesta por intercrecimientos de feldespatos (Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).
- e) Rocas volcánicas del Mioceno. Están constituidas por emisiones de tobas y lavas que en algunos lugares se encuentran estratificados con brechas volcánicas. Las lavas son andesitas de laprobolita o de augita de textura porfirítica-afanítica con andesita. El espesor de las rocas volcánicas es de 100 a 200 metros.
- f) Depósitos lacustres del Plioceno. En el Plioceno medio se desarrollaron varias cuencas endorreicas superficiales, las cuales dieron lugar a la formación de extensos y profundos depósitos lacustres. Dichos depósitos están formados por arcillas con materia orgánica, suelos palustres, estratos de tobas y cenizas volcánicas, así como depósitos de suelos fluviales y estratos de caliza.
- g) Vulcanitas del Plioceno. Su origen se sitúa del Plioceno medio a superior son de fenobasáltos con olivino. Se intercalan con depósitos lacustres debido a los períodos de calma en los volcanes del área.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5 El Escenario Geológico

La cuenca de Puebla se encuentra entre montañas del Terciario y rodeada de estratovolcanes del Cuaternario así como de montes y cerros de calizas del Cretácico Superior, esta rellena de tobas volcánicas, derrames de lava, conos cineríticos, depósitos lacustre fluviales y material glacio-fluvial re TRABAJADO de las estructuras más altas.

Estos son algunos de los estudios estratigráficos y geológicos de la región (Erffa et., 1976, Salazar-Mandujano, 1970, Vázquez-Sánchez and Jaimes-Palomera, 1989, Moonser et al., 1996). Sin embargo se puede proponer que la cuenca se encuentra entre montañas y descansa sobre un basamento antiguo. En la Sierra del Tentzo, en el sur del área de estudio, existe un importante afloramiento que describe al Complejo Acatlán del Paleozoico. Este complejo esta formado por una reunión unidades tectónico heterogéneo y unidades metamórficas que fluctúan desde esquistos verdes a facies de eclogita (Ortega- Gutiérrez, 1978, 1993). Arenisca continental, esquistos, y caliza marina del Jurásico y del Cretácico Inferior, sobreyacen al complejo Paleozoico (Erffa et al., 1976). Esta secuencia sedimentaria se identifica hacia el sur de la ciudad de Puebla, fuera de la región de estudio, es conformada por rocas sedimentarias del Cretácico Superior, tales como caliza marina con inter estratificaciones de arenisca y esquistos (Salazar-Mandujano, 1970). Las calizas son de estratos delgados, contienen lentes y nódulos de pedernal oscuro. Estas rocas estaban fuertemente plegadas y fracturadas antes de iniciarse el Terciario y la actividad volcánica del área.

Se deposita un estrato de conglomerado sobre la secuencia sedimentaria del Mesozoico, situado al sur de la región de estudio, el Grupo Balsas es probablemente el primer evento en el periodo Terciario. Este último está compuesto por fragmentos sedimentarios y metamórficos originados de formaciones precedentes (Erffa, 1976). Sobre del grupo Balsas se encuentra derrames de lava y tobas de composición dacítica y riolítica. Mooser et al. (1996) sugiere que el espesor de estas rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno pueden alcanzar más de 1000 m en algunas regiones, y la mayoría de estas son cubiertas por eventos volcánicos más recientes. Solamente hacia el sur de la frontera del área de estudio, pueden ser identificados algunos domos, cuellos de volcanes y conos.

Erffa (1976) y Mooser et al. (1996) proponen la existencia de sedimentación lacustre durante el periodo Plioceno, asociándolo a los resultados de más eventos volcánicos. Un ejemplo de este proceso sedimentario continental es la presencia en los espesores de la estratificación de materiales volcánicos re TRABAJADOS como escoria, ceniza, además fragmentos de vidrio y carbonatos. El afloramiento de estos sedimentos lacustre pueden alcanzar 200 m de espesor y se encuentran hacia la frontera norte de la cuenca de Puebla cerca de la ciudad de Tlaxcala y en algunas regiones hacia el sur de la frontera. Algunos materiales re TRABAJADOS de los eventos de derrames de lava y tobas pueden estar interestratificados.

Los estratovolcanes más importantes como La Malinche al este, el Iztaccíhuatl y Popocatepetl al oeste en la Sierra Nevada, comenzaron su actividad durante el Plioceno y el Pleistoceno. Estos volcanes son las estructuras volcánicas más espectaculares de la parte central de la Faja Volcánica Trasmexicana. La construcción y destrucción de estos aparatos volcánicos ha proporcionado abundante material volcánico dentro de la cuenca de Puebla. Se pueden encontrar algunos derrames de lava, ignimbritas tobas, pero también lahares, paleosuelos y materiales glacio-fluviales retrabajados, formados por los estratovolcanes. El espesor para el Plioceno-Cuaternario de material volcánico en la cuenca de Puebla no es conocido pero una buena estimación es de varios cientos de metros. Durante el Cuaternario la cuenca de Puebla y áreas cercanas fueron afectados por dramáticos cambios climáticos (Abrams and Siebe, 1994). Extensos lagos ocuparon la frontera sur de la cuenca y grandes glaciares cubrieron la cumbre y los alrededores de los volcanes. Durante este periodo la actividad volcánica continuó en el volcán Popocatepetl. Así como también en numerosos volcanes monogenéticos básicos-andesíticos y andesíticos. Estos con una orientación típica este-oeste, que indica la existencia de un sistema de fallas de este hacia el oeste, en la parte central de la Faja Volcánica Trasmexicana.

Son escasos los estudios estructurales del área, pero observaciones de fotogeología sugieren para el pos-Mioceno movimiento de fallas normales en los alrededores de la ciudad de Puebla (Ferrari et al., 1994). La medida del deslizamiento de estas fallas en el área no se ha reportado. En ciertas perforaciones se tiene que la extensión horizontal de los esfuerzos tiene orientación E-W y de NE-SW, el principal y mayor esfuerzo se encuentra en la parte oriental de la Faja Volcánica Trasmexicana.

Los estudios tectónicos realizados por Mooser (1972) y la compañía de Geotecnología (1997) muestran tres importantes estructuras: el graben Puebla-Atlixco con orientación N al NE; el graben Iztaccíhuatl-Malinche con orientación E-W y la falla Popocatepetl que inicia en el aparato volcánico del mismo nombre.

1.6 Estratigrafía de la Cuenca de Puebla

Se presenta la estratigrafía de la Cuenca de Puebla que incluye la zona de Xoxtla y barranca Honda, basada en el trabajo de Mooser F. et al. (1996) y en los estudios de la sección 1.5. Además se correlaciona con las unidades geoelectricas, que son materiales con un mismo rango de resistividad eléctrica, obtenidas de un estudio de Sondeos Eléctricos Verticales realizado para la SOAPAP.

- a) Esquisto Acatlán. En el tercio sur de la región estudiada se encuentran depósitos marinos y continentales, cuyas edades abarcan desde el paleozoico medio hasta fines del período Cretácico. Estos depósitos han sido plegados por procesos orogénicos. El grupo esquisto Acatlán representa los depósitos más antiguos del área estudiada, yace sobre gneisses

precámbricos del Macizo Oaxaqueño, el cual contiene evidencias de antiguas orogenias.

- b) Depósitos calcáreos de origen marino del Cretácico. Representa al periodo Cretácico Superior, se conocen como la formación Maltrata, compuesta por estratos densos y gruesos de caliza, también se encuentran margas, areniscas y lutitas. Estos depósitos forman paquetes estratigráficos de aproximadamente 1000 metros de espesor, los cuales debido a esfuerzos tectónicos, formaron plegamientos y cabalgaduras durante la orogenia Laramídica del Eoceno Inferior.
- c) Formación Balsas. Se trata de areniscas, conglomerados y lodolitas arenosas continentales que se originan en el Eoceno superior. Aparecen en forma de rellenos y de abanicos aluviales. Como estos sedimentos se derivan de la erosión de los cuerpos anticlinales laramídicos, abundan los clastos calizos.
- d) Rocas volcánicas del Oligoceno. En la parte superior de este grupo se encuentran derrames lávicos que sobreyacen a secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brecha tobácea y aglomerados. Estos depósitos están, interestratificados con clásticos aluviales de espesor promedio de seis metros, lo que indica una interrupción en la actividad volcánica. La composición varía de andesítica a riódacítica. Los flujos lávicos según el análisis petrográfico son porfiríticos-holocristalinos, con fenocristales de andesita, oligoclasa, cuarzo, augita, e hiperstena, que yacen en una matriz compuesta por intercrecimientos de feldespatos (Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).
- e) Rocas volcánicas del Mioceno. Están constituidas por emisiones de tobas y lavas que en algunos lugares se encuentran estratificados con brechas volcánicas. Las lavas son andesitas de laprobolita o de augita de textura porfirítica-afanítica con andesita. El espesor de las rocas volcánicas es de 100 a 200 metros.
- f) Depósitos lacustres del Plioceno. En el Plioceno medio se desarrollaron varias cuencas endorreicas superficiales, las cuales dieron lugar a la formación de extensos y profundos depósitos lacustres. Dichos depósitos están formados por arcillas con materia orgánica, suelos palustres, estratos de tobas y cenizas volcánicas, así como depósitos de suelos fluviales y estratos de caliza.
- g) Vulcanitas del Plioceno. Su origen se sitúa del Plioceno medio a superior son de fenobasáltos con olivino. Se intercalan con depósitos lacustres debido a los períodos de calma en los volcanes del área.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

h) Derrames Basálticos del Cuaternario

A esta unidad se le asignan aquellos aparatos volcánicos que representan rasgos geomorfológicos relativamente jóvenes. En la cuenca de Puebla están representadas por cuerpos fenobasálticos situados al sur-poniente de la Malinche en el Cuaternario Inferior.

Vulcánitas que por su morfología se asignan al Cuaternario en general, representado por los conos al oeste de la ciudad de Cholula así como en la Sierra Nevada y la Malinche.

- i) Depósitos del Cuaternario Reciente. Constituyen un paquete estratigráfico formado por la alternancia de material de origen lacustre, materiales no consolidados de origen volcánico, y aluvial. La existencia de caliza se explica por el transporte hacia la superficie de la calcita en solución y suspensión por aguas termales y sulfurosas de acuíferos localizados a una profundidad del orden de 160 metros. Los depósitos de origen lacustre se encuentran expuestos superficialmente en el centro histórico de la ciudad de Puebla.

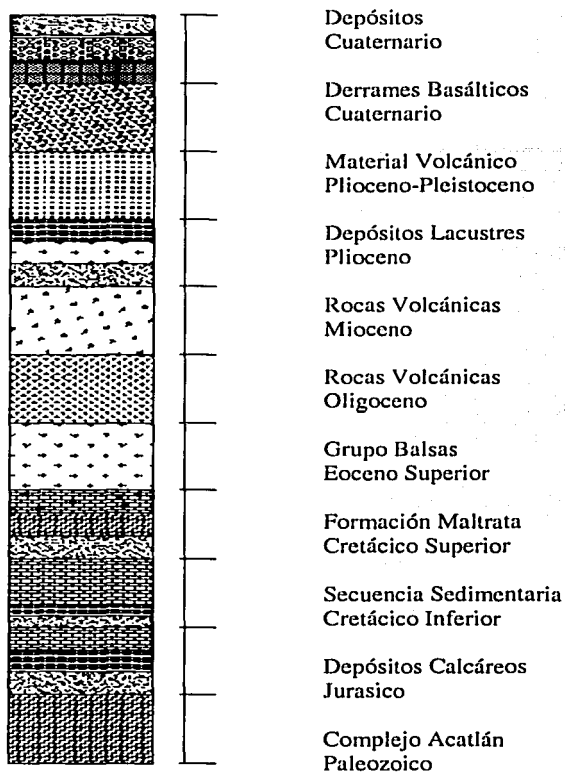
1.7 Geología Estructural

La Faja Volcánica Transmexicana, se formó en una zona de fallas de tensión de orientación norte-sur y noroeste-sureste y noreste-suroeste, que dieron lugar a grandes fosas tectónicas y aparatos volcánicos. En esta región se presentan rasgos de grandes estructuras de dislocación, que han cortado el territorio poblano en varios cientos de kilómetros. Los principales volcanes que la entidad comparte con los estados vecinos son estratovolcanes de grandes dimensiones, como el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Pico de Orizaba, y La Malinche. Los dos primeros aparatos se alinean notoriamente en dirección norte-sur. Estas grandes estructuras fueron formadas por emisiones alternadas de productos piroclásticos y derrames lávicos. Además, muestran evidencias de emisiones fisurales, y numerosos conos adventicios que se han desarrollado en sus laderas. Otras estructuras importantes, son los conos cineríticos dispersos por toda la provincia.

La porción sur del estado es de alta complejidad estructural, en la que se presentan varios dominios tectónicos yuxtapuestos. Las rocas más antiguas manifiestan varias etapas de deformación, intrusión y metamorfismo de tipo regional y cataclástico. Las estructuras de mayor relevancia son las que reflejan las etapas de deformación plástica y cataclástica, como son plegamientos y fallas normales e inversas, y diversos sistemas de fracturas orientados generalmente noroeste-sureste.

Las rocas del Terciario Inferior presentan combamientos con echados de más de 45°; en cambio, los depósitos volcánicos del Terciario Superior están por lo general en forma horizontal, con algunos basculamientos, fallas y fracturas de orientación diversa (<http://pue.inegi.gob.mx/territorio/espanol/>).

En la figura 1.2 se ilustra la columna estratigráfica de la cuenca de Puebla



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.2 Columna estratigráfica para la cuenca de Puebla reconstruida de la sección 1.5 y 1.6.

1.8 Sistema Acuífero del Valle de Puebla

1.8.1 Esgurrimiento Superficial

Con base en la regionalización hidrológica, elaborada por la CNA, el Valle de la ciudad de Puebla, se encuentra en la región hidrológica No. 18 denominada "Río Balsas" y comprende 20 328.17 Km². Esta región tiene como tributario principal al río Atoyac, que es la corriente que da origen al río Balsas y es considerada la más importante. También es tributario el río Zahuapan (corriente tlaxcalteca) que baja

de la sierra de Tlaxco. El gasto medio de las corrientes en esta cuenca es de 9.152 m³/s, el río Atoyac se origina por los deshielos a más de 4000 m de altitud del flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl y precipitaciones pluviales sobre los cerros Tlaloc, Telapón y Tecama. Entre las corrientes que descargan en el cauce del río Atoyac en sus primeros kilómetros son: El río Tlahuapan, Turín, Otlali, Atotonilco y San Jerónimo, adopta el nombre de río Atoyac a partir de la integración de los ríos Turín y Tlahuapan, atraviesa la ciudad de Puebla y desemboca en la Presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) con capacidad de 405 Mm³ esta presa pertenece al distrito de riego No. 030 "Valsequillo", que cubre una superficie de 16300 hectáreas, con lo que beneficia a 8150 usuarios (Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla SARH, 1992).

Estas corrientes presentan un régimen natural permanente, y al abandonar el estado de Puebla cambian su nombre por el de río Mexcala.

A causa del abatimiento del nivel piezométrico regional, es probable que en algunos tramos de los ríos Atoyac y Zahuapan, hayan cambiado su papel de extracción de agua del acuífero 'Valle de Puebla', y ahora aportan agua a este último.

Se genera un escurrimiento virgen anual de 1291 Mm³ de los que, 1088 Mm³ salen hacia el estado de Guerrero. Esta región hidrológica recibe las aportaciones de los Estados de Tlaxcala, Morelos y Oaxaca, con un volumen escurrido de 1451 Mm³.

En el estado natural de los acuíferos, el agua infiltrada en las áreas de recarga circulaban en el subsuelo hacia los vertedores naturales. La descarga natural ocurría a lo largo de las corrientes colectoras, en forma de manantiales y por evapotranspiración.

La corriente colectora más importante era el Río Atoyac, cuyo caudal base (aportación del subsuelo) mínimo era de 0.25 m³/s, durante los periodos de estiaje, en una estación hidrométrica.

Tales condiciones naturales de descarga comenzaron a modificarse en la década de los años "50", a causa del aprovechamiento intensivo de los recursos hidráulicos. Así el caudal base del río Atoyac fue decreciendo, hasta su agotamiento en la década de los "70" (Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla, SAHR 1992).

En la figura 1.3 se observan las corrientes superficiales más importantes del Valle de Puebla, las curvas de igual elevación (m.s.n.m.), así como la división política de Puebla, Tlaxcala y Estado de México. Es evidente la contribución en recarga de los aparatos volcánicos Popocatepetl, Iztaccíhuatl, y Malinche.

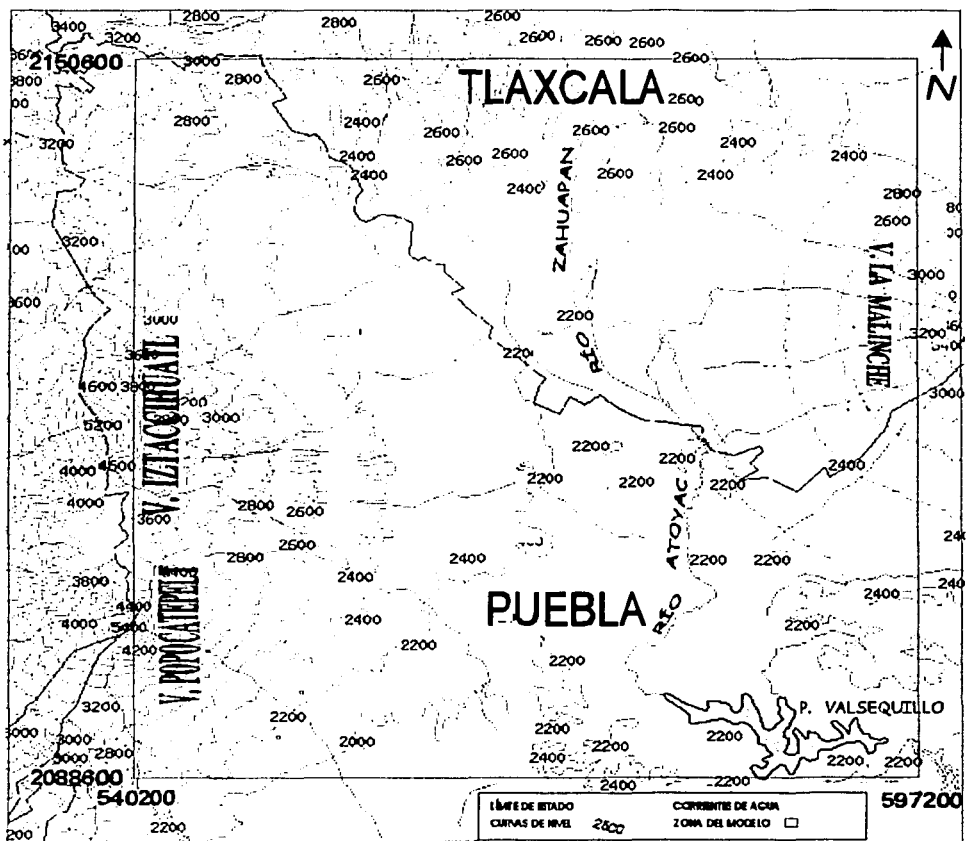


Figura 1.3 Hidrología superficial del área, acuífero "Valle de Puebla".

1.8.2 Condiciones Geohidrológicas

Los acuíferos del estado de Puebla han sido estudiados desde la década de los años 60. Estos se encuentran distribuidos en cinco zonas geohidrológicas, denominadas: "Valle de Puebla", "Cuenca de Oriental", "Tecamachalco", "Atlixcolzúcar de Matamoros" y "Tehuacán", estando incluidas las cuatro primeras en la Cuenca del río Balsas, y la última en la subcuenca del río Salado.

La cuenca de Puebla se encuentra sobre un antiguo basamento compuesto por rocas metamórficas del Paleozoico que es el Complejo Acatlán y por rocas calcáreas terrígenas del Mesozoico (Ortega-Gutiérrez, 1978, 1993; Mooser et al., 1996; Erffa et al., 1976). Se localiza algunos afloramientos de este antiguo basamento al sur-este de la cuenca, en la Sierra del Tentzo y el Serrijon de Amozo. Se considera que las rocas calcáreas del Mesozoico conforman un acuífero más profundo en el sur de la cuenca. Los conglomerados del Terciario, las coladas de lava andesítico-dacítico y las tobas rellenan a la cuenca. Mooser et al. (1996) sugiere que esta secuencia terciaria alcanza más de 1000 m de espesor. Las características litológicas de esta secuencia son muy importantes ya que conforman al acuífero. Los depósitos lacustres del Plioceno están emplazados en la mayor parte de la cuenca y alcanzan más de 200 m de espesor en la frontera norte. Estos sedimentos continentales pueden ser considerados como una capa impermeable que separa al acuífero desde el Plio-Cuaternario, de los acuíferos más profundos.

La mayor construcción y destrucción (actividad) de los estratovolcanes tales como La Malinche hacía el este, el Iztaccíhuatl y Popocatepetl en la sierra nevada hacía el oeste, ocurrió en el Plio-Cuaternario, aportando abundante material volcánico dentro de la cuenca de Puebla. El espesor de los estratos de los materiales volcánicos tales como derrames de lava, ignimbritas, lahares, tobas paleosuelos y sedimentos glacio-fluviales retrabajados no son conocidos, pero hay una estimación de varios cientos de metros. Está reciente secuencia conforma el principal acuífero del cual se abastece a la ciudad de Puebla. Algunos volcanes monogenéticos andesíticos con una orientación este-oeste se presentan en varias localidades de la cuenca, produciendo irregularidades en el acuífero. Estos aparatos volcánicos han controlan los espesores y las secuencias sedimentarias dentro de la cuenca

El acuífero "Valle de Puebla" tiene una extensión de aproximadamente 1470 Km². Su porción superior está compuesta por materiales aluviales no consolidados como gravas y arenas; su espesor varía entre unos cuantos metros cerca de sus bordes, y más de 200 m, en el área de la ciudad de Puebla, con valor medio de 130 m; tiene permeabilidad de media a alta, y contiene agua de buena calidad, excepto en algunos sectores de esa área. La parte inferior del acuífero está constituida por rocas ígneas extrusivas fracturadas basaltos y andesitas; tiene espesor de varios cientos de metros, y esta limitada inferiormente por rocas calcáreas, consideradas como el basamento geohidrológico de la cuenca. Entre ambas porciones del acuífero, se extiende un horizonte arcilloso poco permeable que al comportarse como un acuitardo, permite la conexión hidráulica vertical entre los sedimentos y las rocas fracturadas. (SARH 1992, op. cit.).

La unidad hidrogeológica esta conforma por tres acuíferos Superior, Medio y Profundo.

Acuífero Superior

Es un acuífero libre formado por depósitos aluviales de alta permeabilidad y depósitos eólicos de origen volcánico cuaternarios y terciarios débilmente cementados, cuya granulometría reporta arenas finas, limos y arcillas, su permeabilidad es de aproximadamente 1×10^{-3} a 1×10^{-5} cm/s. Su espesor promedio comprende 130 m, en sus bordes es de pocos metros y en su porción central alcanza más de 200 m (área circundante a la ciudad de Puebla). En muchas partes de la ciudad de Puebla, existe un paquete de calizas y travertinos lacustres interestratificados con 40-50 m de profundidad.

La frontera inferior del primer acuífero lo constituyen depósitos lacustres arcillo-limosos del Plioceno, cuyo espesor al poniente del valle alcanza 150 m, muestra una baja permeabilidad y funciona como acuitardo entre el primero y el segundo acuífero.

Acuífero Medio

Es un acuífero confinado superiormente por un estrato lacustre de arcillas de baja permeabilidad del Plioceno que funciona como acuícludo. Este acuífero medio esta formado por vulcanitas del Plioceno, vulcanitas Ixcala del Mioceno, tobas Caulapan y vulcanitas del Oligoceno, y materiales de la formación Balsas. En su base esta confinado por calizas y margas del Cretácico de muy baja permeabilidad, su conductividad hidráulica es menor que la del acuífero superior. Su espesor promedio es de 200 m, aunque debido a la presencia de fallas normales e inversas su elevación es variable. La presencia de fallas en este acuífero permite que aumente su permeabilidad por fracturamiento. Este acuífero es importante dentro de las fosas tectónicas Iztaccíhuatl-Malinche y Atlixco Puebla.

Acuífero Profundo

Es un acuífero confinado superiormente por un estrato de calizas y margas de muy baja permeabilidad que se califica como acuícludo, está formado por depósitos marinos calcáreos del Cretácico inferior. En este estrato están presentes cavidades de disolución interconectados entre sí que le confieren permeabilidad secundaria, también esta afectado por dislocaciones de origen tectónico lo que hace variar su espesor, se deduce que alimenta al acuífero intermedio con aguas fósiles. Este acuífero sobreyace formaciones más antiguas de esquistos metamórficos del complejo Acatlán.

Algunos estudios que justifican las características de los acuíferos antes descritos, se muestran en el Apéndice 1, sección 4, tabla No. 8.

1.8.3 Zona de recarga

El Valle de Puebla cuenta con 17 estaciones climatológicas la más antigua y representativa es la de la ciudad de Puebla que data del año 1921, se tienen reportes climatológicos hasta el año de 1990 ver Apéndice tabla No.7.

El clima de la región se clasifica como templado, subhúmedo, con lluvias en verano, el porcentaje de precipitación invernal es menor de 5 mm. Manifiesta también condición de canícula (pequeña temporada con receso de lluvias dentro de la estación), aproximadamente en la segunda quincena del mes de julio denominada sequía de verano. La temperatura en la ciudad de Puebla oscila entre 16 y 18 °C y en la ciudad de Tlaxcala varía entre 14 y 16 °C. La temperatura media anual del Valle de Puebla es de 16.6 °C.

La precipitación pluvial media anual en la zona del volcán la Malinche es de 1000 mm, en la estación Río Frío representativa de las precipitaciones de la Sierra Nevada registra valores de 1000 mm, desde la ciudad de Puebla y hasta Tlaxcala, la precipitación pluvial fluctúa entre 800 y 1000 mm al año, hacia la parte sur del valle en la presa de Valsequillo es de 770 mm/año.

Se puede concluir que en la región donde se ubican las estaciones climatológicas la temporada de precipitación pluvial ocurre de mayo a octubre y la época de estiaje es de noviembre a abril.

Las fuentes naturales que recargan al acuífero son la precipitación pluvial y los escurrimientos superficiales. Las principales áreas receptoras de recarga se encuentran en los flancos del volcán la Malinche y la sierra Nevada. La zona de recarga del volcán Iztaccíhuatl, cerros Telopon y Tlaloc originan un flujo subterráneo con dirección NW-SE. Dicho flujo coincide aproximadamente con el cauce del río Atoyac, dren superficial y subterráneo de la cuenca, pasa por la ciudad de San Martín Texmelucan y se une con el flujo proveniente del volcán Popocatepetl que tiene un rumbo NW-SE. La zona de recarga de este volcán origina un flujo de agua subterránea en dirección NW-SE pasando por las poblaciones de San Nicolás de los Ranchos y San Andrés Calpan. Un poco antes de la ciudad de Cholula, su corriente se une con las otras corrientes de recarga. La recarga de la Malinche origina un flujo subterráneo con dirección NE-SW desde la ciudad de Tlaxcala coincidiendo en forma aproximada con el río Zahuapan que es un dren subterráneo y superficial de la cuenca. Este flujo se encuentra con el proveniente de la zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl, a la altura de la población de Nativitas Tlaxcala, posteriormente sigue un rumbo sureste pasando por la ciudad de Cholula y la ciudad de Puebla (Geotecnología S.A., 1997).

1.8.4 Zona de descarga

En el estado natural de los acuíferos, el agua infiltrada en las áreas de recarga circulaba en el subsuelo hacia los vertedores naturales. La descarga natural ocurría a lo largo de las corrientes colectoras, en forma de manantiales y por evapotranspiración.

La corriente colectora más importante era el río Atoyac, cuyo caudal base (aportación del subsuelo) mínimo era de 0.25 m³/s durante los periodos de estiaje. Tales condiciones naturales de descarga comenzaron a modificarse, en la década de los años "50" a causa del aprovechamiento intensivo de los recursos hídricos. Así, el caudal base del río Atoyac fue decreciendo, hasta su agotamiento en la década de los "70" y desde entonces a la fecha, sólo conduce agua en los periodos de estiaje.

Conforme a las condiciones hidrogeológicas originales del acuífero superior, sus descargas se realizaban de tres formas:

- 1.- En forma subterránea en dirección de zonas más bajas situadas al sur del Valle de Puebla.
- 2.- Por el drenado de sus aguas freáticas a través de los ríos más importantes: Atoyac, Zahuapan y Alseseca.
- 3.- Por evapotranspiración, este proceso se efectúa principalmente en el norte y oeste del Valle de Puebla en donde existe gran cantidad de vegetación (bosques)
- 4.- Por evaporación, las regiones sur y este del valle presentan zonas áridas.

1.8.5 Nivel estático

En acuíferos libres el nivel estático se define como el lugar geométrico de los puntos en que el agua se encuentra a la presión atmosférica. El nivel estático del agua subterránea está determinado por: la cantidad de precipitación, evapotranspiración, espesor del estrato permeable superficial, la existencia de lagos y ríos, volumen de extracción y recarga del agua, topografía local y regional.

El análisis cuantitativo y cualitativo de la fluctuación del nivel estático permite obtener un panorama general sobre las condiciones hidrodinámicas del agua subterránea y el volumen potencial de las reservas de agua. En seguida se indican los cambios en los niveles freáticos ocurridos en el Valle de Puebla en el período comprendido de 1973 a 1996 con base a los registros de pozos obtenidos por la CNA y los estudios de la compañía Geotecnología S.A. ver apéndice 1.

En la zona de recarga de la Sierra Nevada, la máxima elevación del nivel estático es de 2450 m y en la Malinche es de 2300 m.s.n.m., en estas zonas se tienen las más altas elevaciones del nivel estático disminuyendo paulatinamente conforme se acercan a la ciudad de Puebla, registrándose en la parte norte de la ciudad una elevación de 2140 m.s.n.m. y en la parte sur 2110 m.s.n.m.

Nivel estático 1973

El primer estudio realizado en la zona data de 1973, donde se presenta una configuración piezométrica con las curvas de igual elevación de los niveles estáticos (figura 1.4). Representa las condiciones más cercanas a las originales en la región antes de iniciarse su explotación desmedida.

Nivel estático 1980

Las isocurvas del nivel freático (figura 1.5) no marcaron cambios considerables con las de 1973. Se advierten las mismas zonas de recarga, y los mismos flujos subterráneos que conservan sus direcciones, así como la posición de las curvas configuradas con el mismo valor.

Nivel estático 1996

Se cuenta con una mayor información ya que aumentó considerablemente el número de pozos. En este año se aprecia que la disminución de la elevación de las isocurvas manifiesta un significativo abatimiento del nivel estático (figura 1.6) a partir de la ciudad de Cholula acentuándose esta disminución hacia la ciudad de Puebla.

En Cholula para los años 1973-1980 se tiene una isocurva de elevación de 2160 a 2140 m.s.n.m., al término de 1996 el valor de las isocurvas es de 2100 a 2080 m.s.n.m., el abatimiento del nivel estático en esa zona es de aproximadamente 60 metros a razón de aproximadamente 3 m por año. Un abatimiento suficiente para dejar fuera de alcance a las bombas y por ende, pozos fuera de servicio.

En la ciudad de Puebla para los años de 1973-1980 se tienen isocurvas de elevación del nivel estático del orden de 2120 m.s.n.m. y terminando el año 1996 las isocurvas tienen un valor de 2060 m.s.n.m. a 2040 m.s.n.m., es decir el nivel estático disminuyó del orden de 80 m. Es evidente que el aumento de la profundidad del nivel estático es más importante en la ciudad de Puebla y en menor proporción en la ciudad de Cholula para el mismo año.

En esta zona del corredor Cholula-Puebla es en donde se efectúa el mayor volumen de extracción de agua coincidiendo con las áreas de mayor densidad de Población. El mayor número de pozos se encuentra en la ciudad de Puebla y debido a la urbanización casi todas las rutas de recarga se han deshabilitado.

Para obtener las isocurvas de la sección 1.8.5 nos basamos en estudios previos, ver apéndice1, sección 3, tabla No.6. Las tres isocurvas antes mencionadas se modificaron del "Estudio Hidrogeológico del Valle de Puebla SOAPAP". Generadas utilizando una interpolación en Surfer 7.

1.8.6 Abatimiento de los Niveles Piezométricos

En las figuras 1.7 y 1.8 se observa el abatimiento del nivel piezométrico en el acuífero del Valle de Puebla para el período que comprende los años 73 a 80, y 73 a 96 respectivamente.

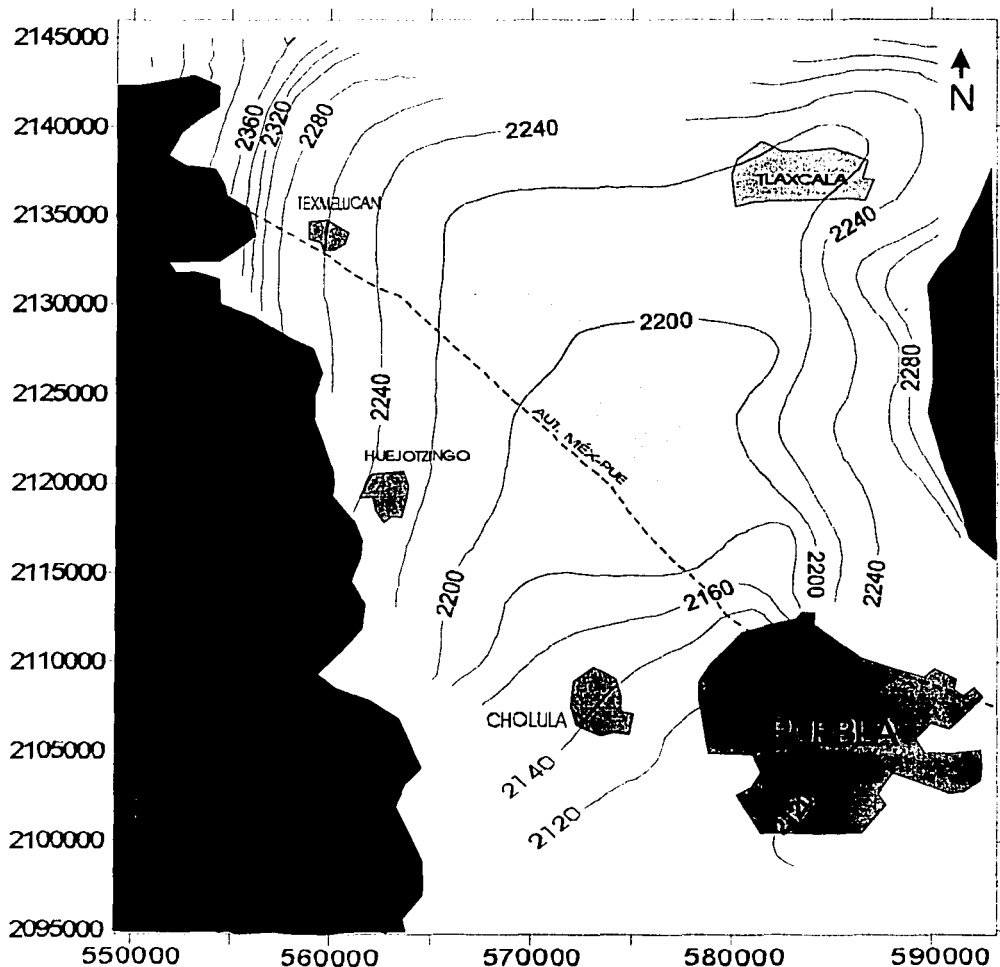


Figura 1.4 Curvas de igual elevación del nivel estático junio - julio de 1973.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la figura 1.7 tenemos que la mayor parte de la superficie cubierta por la configuración no presenta un abatimiento del nivel estático. Pero en la zona que corresponde a la ciudad de Puebla se presenta un considerable abatimiento de 20 a 30 metros en promedio.

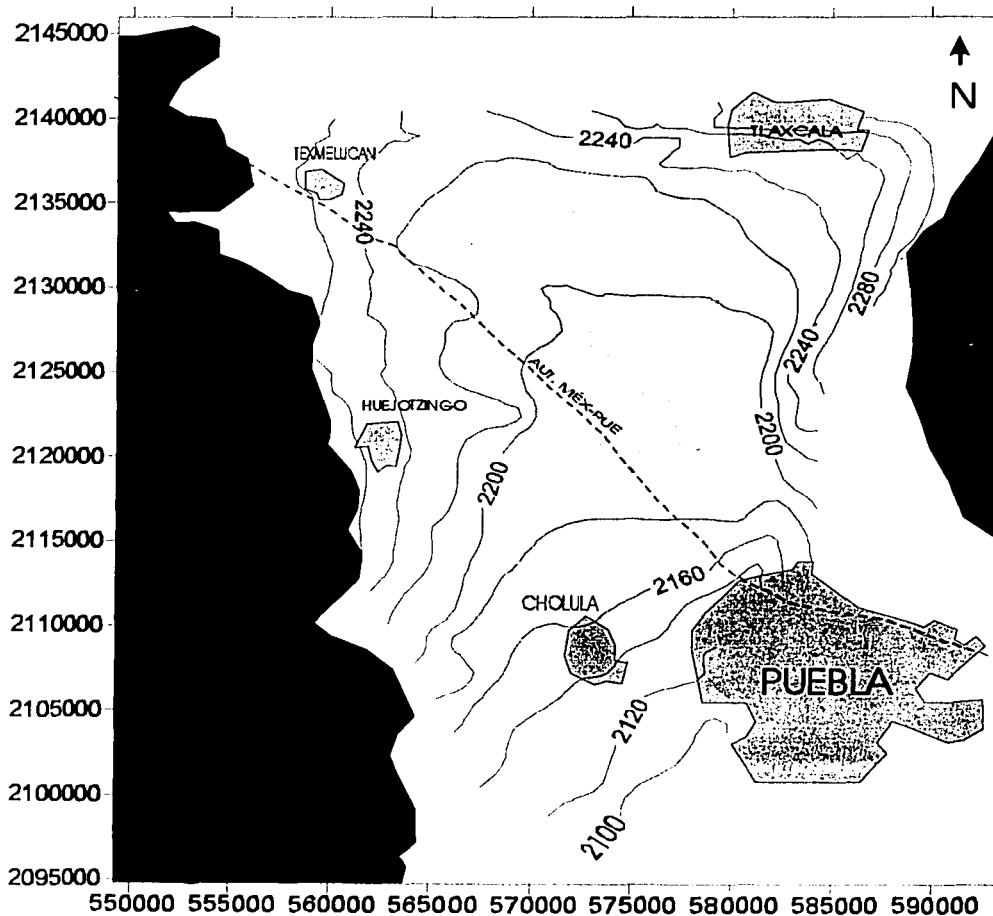


Figura 1.5 Curvas de igual elevación del nivel estático octubre - noviembre de 1980.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por otro lado tenemos una gran diferencia del nivel de abatimiento que se ilustra en la figura 1.8. La disminución del nivel estático sólo es de un par de metros, cerca de los aparatos volcánicos ya mencionados. Mientras que la región sur del valle sufre un abatimiento del orden de 80 m. Clara sobre-explotación que se realiza a causa de la urbanización, zona industrial, distrito de riego y otros factores.

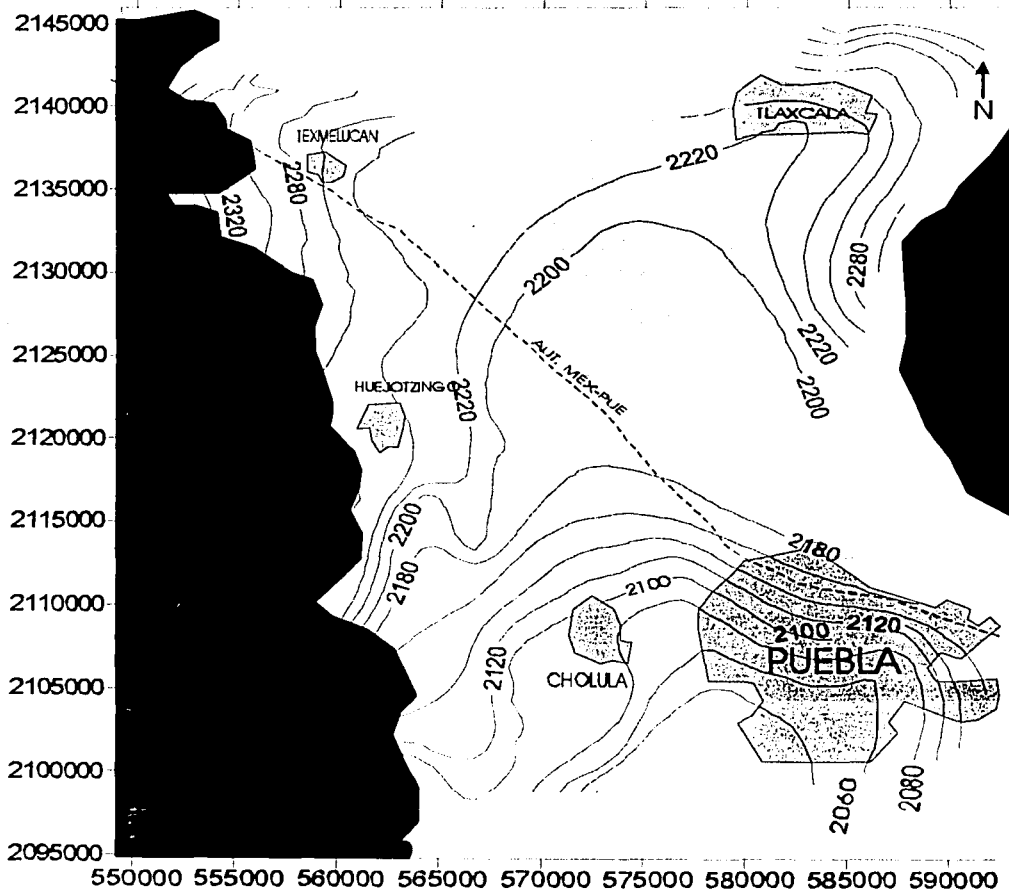


Figura 1.6 Curvas de igual elevación del nivel estático noviembre de 1996.

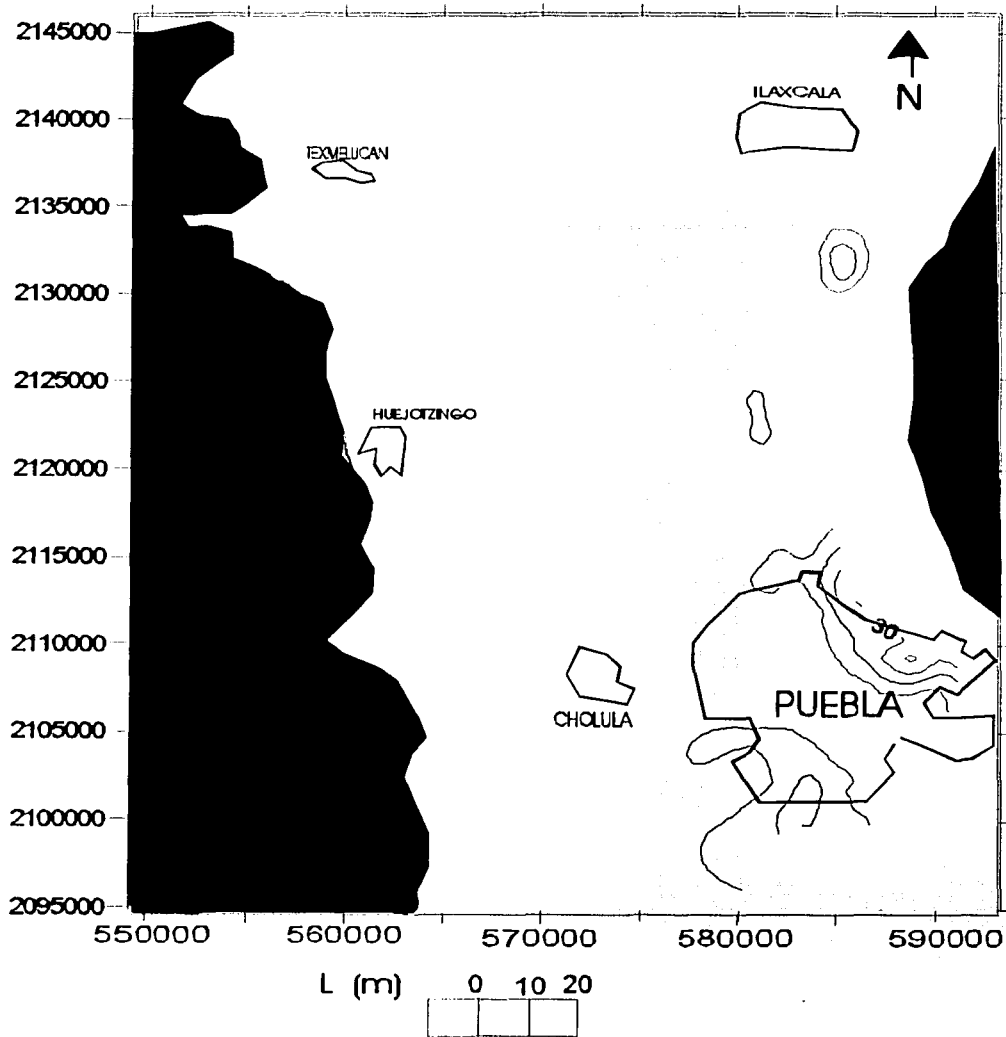


Figura 1.7 Abatimiento para los años de 73 a 80.

Los valores obtenidos del abatimiento utilizando una interpolación numérica son corroborados con las curvas de las figuras 1.4 y 1.6.

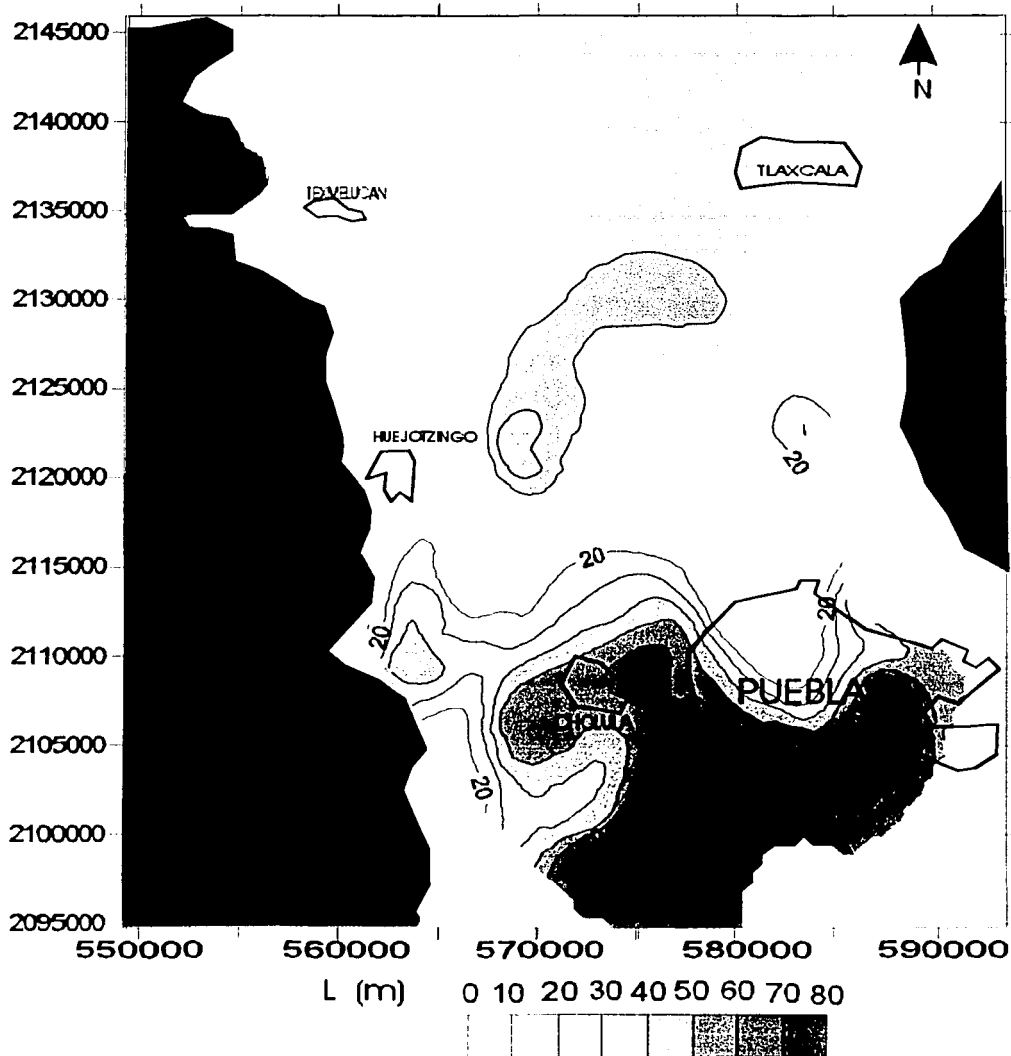


Figura 1.8 Abatimiento para los años de 73 a 96.

Algunos datos que justifican las figuras de la secciones 1.8.5 y 1.8.6, se presentan en el apéndice 1.

1.9 Balance de aguas subterráneas

Para realizar la estimación de la evolución del modelo es fundamental conocer la ecuación de balance volumétrico para el sistema acuífero, y se describe a continuación.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga) representa el volumen de agua perdido o ganado anualmente por el almacenamiento no renovable del subsuelo.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

$$\text{Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de almacenamiento (10)}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del sistema acuífero las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica:

$$\text{Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento en la unidad hidrogeológica ... (11)}$$

Cuadro 2.4 Censo de aprovechamientos de agua subterránea realizado en 1996-1997 tipo y uso a que se destinan sus aguas

Tipo	Total	Activo	Inactivo	Aprovechamientos activos según su uso			
				Agrícola	P. Urbano	Doméstico	Industrial
Manantiales	5	5			2	3	
Norias	158	155	3	67	8	78	2
Pozos	731	671	60	230	287	40	114
Total	894	831	63	297	297	121	116

Cuadro 2.5 Estimación de los volúmenes de extracción anuales en m³

	Agrícola	P. Urbano	Doméstico	Industrial	Total
Manantiales		473 040	47 304		520 344
Norias	6 862 882	1 263 744	1 718 036	34 164	9 878 826
Pozos	71 709 106	161 301 916	10 549 828	61 945 893	305 506 743
Total	78 571 988	163 038 700	12 315 168	61 980 057	315 905 913

Atendiendo a este índice, el uso público-urbano resulta el usuario más importante con el 51.6 % del total; le sigue el uso agrícola que representa el 25.8 % del

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

consumo total; después el industrial con un 18.7 %, y por último el uso doméstico con el 3.9 % restante.

De la ecuación (11) también se establece:

Precipitación = salidas ± variación de almacenamiento del acuífero (V)(12)
donde:

Precipitación es el volumen de agua que se precipita en la cuenca vía: lluvia, nieve y granizo. En el caso del Valle de Puebla se tienen nevadas en las partes altas de los volcanes. Las salidas incluyen extracción, salidas superficiales y salidas subterráneas.

La ecuación (12) es aplicable a una región o unidad cualquiera y en un lapso de tiempo cualquiera. Cuando se emplea en flujo se denomina ecuación de la continuidad y en hidrogeología se conoce como ecuación de balance.

La ecuación de balance hídrico puede variar en los términos dependiendo de las variables que se presenten, por ejemplo en una zona puede no haber extracción o incluso pueden no existir corrientes superficiales (Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla 1992). Así tenemos:

$$R_t - B - S_{rio} - E_v - S_h = \Delta VS$$

donde

R_t = recarga total

R_v = recarga vertical

B = extracción por bombeo

D_n = descargas naturales

E_h = entradas subterráneas

E_v = evapotranspiración

S_{rio} = salidas por corrientes superficiales

S_h = salidas subterráneas

ΔVS = cambio de almacenamiento en el acuífero.

Debido a que es imposible tener un control exacto de las extracciones, aprovechamientos, usos del agua subterránea, ya que se calculan sin considerar a todos los elementos que participan. En este trabajo se cuenta con los datos de los cuadros 2.4, 2.5, y 2.6 que son muy aceptables.

Al diseñar un modelo matemático de flujo de aguas subterráneas, es indispensable recurrir al balance del agua subterránea. Para calibrar la simulación, se utilizó el cuadro 2.7, que se apoya en los cuadros anteriores (Estudios Hidrogeológicos del Valle de Puebla, Geotecnología S.A., 1996- 1997).

Cuadro 2.6 Balance de aguas subterránea, Valle de Puebla.
Valores Mm³ anuales

ENTRADAS		ENTRADAS	
Eh (Iztaccihuatl)	110.25	Horizontal	189.0
Eh(Malinche)	78.75	Natural	88.2
suma:	189.00	Inducida	30.8
		SUMA	308.0
SALIDAS:		SALIDAS	
Sh	4.62	Bombeo	315.9
Evaporación	100.00	Sh	4.6
Lluvia	693.00	Evaporación	100.0
Uso Agrícola + AP	244.60	SUMA	420.5
Bombeo	315.90		
Vol. drenado	-1,406.25		
S	0.09	Δ Almacenamiento.	-112.5
I	0.13	Δ Almace. neto.	-12.5

Cuadro 2.7 Balance de aguas subterráneas valores Mm³ anuales 1997.

R _v	B	S _{ríos}	Evapotransp	S _{subt.}	Cambio de Almacenam.
363.2	310.8	13.1	106.2	14.8	-83.7

La situación del acuífero de la cuenca de Puebla, es que la descarga es mayor que la recarga y por lo tanto no existe equilibrio, hecho que se manifiesta en la evolución descendente de las isocurvas del nivel saturado para el año de 1980 y en adelante. El cuadro 2.7 representa el balance para el año de 1997. De lo anterior sobresale que la parte sur del acuífero manifiesta un severo abatimiento. Este problema requiere de efectuar más estudios del área en cuestión con el objetivo de conocer y analizar el funcionamiento de este recurso natural. Para explotarlo de la forma más adecuada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO II ESTUDIOS GEOFISÍCOS PREVIOS

2.1 Prospección eléctrica en el Valle de Puebla

Los estudios de exploración geofísica realizados por "SOAPAP" y "CNA" con el propósito de correlacionar las unidades de potencial hidráulico de esta zona, permitieron obtener información de la geometría de los materiales del subsuelo.

El programa de exploración en el Valle de Puebla consistió en tres pseudosecciones en la ciudad de Puebla y doce pseudosecciones en el valle (figuras 2.1 y 2.3) empleando para ello sondeos eléctricos verticales con arreglo Schlumberger (Orellana, 1972) y una abertura máxima entre electrodos de corriente ($AB/2$) de 1000 metros, con lo que en teoría se tiene, una profundidad de investigación aproximada de 330 metros.

Las resistividades eléctricas aparentes y espesores de las capas calculadas al realizar los sondeos eléctricos verticales (corte geoeléctrico) se correlacionaron con los principales afloramientos de la geología regional y el perfil estratigráfico de algunos pozos de extracción de agua, para determinar de manera general el perfil estratigráfico de la zona en estudio.

Mediante el procesamiento de los datos geofísicos se determinaron resistividades eléctricas verdaderas de las diferentes unidades hidrogeológicas del subsuelo y se definieron profundidades y espesores de las mismas (utilizando pruebas de bombeo ver apéndice 1, tabla No.8).

2.2 Descripción de las unidades geoeléctricas en la ciudad de Puebla

Para definir la estratigrafía de la zona en estudio se construyeron tres pseudosecciones geoeléctricas, las cuales fueron correlacionadas con las unidades que conforman el marco hidrogeológico de la región. Todas las exploraciones geofísicas se concentraron en la zona elegida por el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla "SOAPAP".

De estas tres pseudosecciones podemos inferir cuatro unidades geoeléctricas denominadas, de arriba a abajo: U_1 , U_2 , U_3 y U_4

Las unidades U_1 , U_2 y U_3 que aparecen en el cuadro 2.1 están contenidas en la primera de las tres capas del modelo matemático que es el objetivo fundamental del presente trabajo. Esta hipótesis está basada en las condiciones geohidrológicas expuestas en la sección 1.8.2. La unidad U_4 (del cuadro 2.1) representará al basamento en la discretización del sistema acuífero.

Cuadro 2.1 Unidades Geoeléctricas en: A-A', B-B', y C-C'

Unidades	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Características	Espesor (m)
U ₁	18 - 16	Toba limo arenosa, toba limo arcillosa de baja permeabilidad se correlaciona con F. Tarango	10
	13 - 19		4
	20 - 36		30
U ₂	26 - 90	Toba limo arenosa de origen volcánico de permeabilidad media a alta, es el acuífero en explotación	111
	22 - 68		50
	39 - 68		100
U ₃	6 - 9	Sedimentos lacustres limo arcillosos	175
	9 - 15		200
	7 - 21		200
U ₄	300 - 1006	Rocas carbonatadas de edad Cretácica, es el basamento del acuífero; ó rocas andesíticas	No se alcanzó
	276 - 653		
	360 - 439		

2.3 Descripción de las unidades geoeléctricas en el valle de Puebla

2.3.1 Generalidades

En la zona de San Miguel Xoxtla y Barranca Honda se efectuó un programa de exploración geofísica que comprenden treinta y siete Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), distribuidos en doce pseudosecciones geoeléctricas (siete en San Miguel Xoxtla, cinco en Barranca Honda) empleando el arreglo de Schlumberger, (Orellana, 1972), con una abertura máxima entre electrodos de corriente (AB/2) de 1000 metros y se alcanzó una profundidad de investigación de 300 metros.

El procesamiento e interpretación de la información de campo hizo posible construir un perfil de resistividad eléctrica del subsuelo. Los intervalos de resistividad registrados fueron relacionados con los principales estratos de roca y suelos de la región.

2.3.2 Localización de la zona de Xoxtla

Se localiza a 18 Km al NW de la ciudad de Puebla en la margen izquierda de la autopista México-Puebla en dirección a la ciudad de Puebla. Esta área comprende la población de San Miguel Xoxtla y Huejotzingo localizada al oeste de la ciudad de Puebla a 22 Km. La zona de Xoxtla abarca un rectángulo de 20.3 por 38.5 Km con una superficie de 781.5 Km² que colinda al norte con el Estado de Tlaxcala. Esta zona quedó cubierta por siete pseudosecciones geoeléctricas, que se identifican en la figura 2.1.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a) Pseudosección Geoeléctrica A-A'

La conforman los SEV 01-12,16 y 13 con una longitud de 29.2 Km. Ubicándose entre las poblaciones de Santa María Xalmimilulco, Puebla y San Pablo del Monte, Tlaxcala; Los sondeos 01-09 se localizan a un costado de la autopista México-Puebla y el resto al norte de la zona urbana de la ciudad de Puebla; En esta pseudosección se identificaron siete unidades geoeléctricas.

b) Pseudosección Geoeléctrica B-B'

Es perpendicular a la pseudosección geoeléctrica A-A', inicia en el SEV 14 al NW de la población de Santa María Zacatepec y termina en el entronque de la carretera federal México-Puebla, cerca de Huejotzingo, con una longitud de 11 Km y comprende los sondeos 14, 36, 35, 29, 28, y 2.

c) Pseudosección Geoeléctrica C-C'

Esta pseudosección con una longitud de 10 Km. se trazó perpendicular a la sección A-A' y paralela a la B-B'. Se inicia en la población Santa María Zacatepec y termina 2.5 Km al sur de la población de Nativitas Tlaxcala intersectando a la sección A-A' en el SEV 3.

d) Pseudosección Geoeléctrica D-D'

Se inicia en la colonia José Ángeles y finaliza en la población de los Reyes, al SW de la población de Zacatelco, con una longitud de 12.95 Km.

e) Pseudosección Geoeléctrica E-E'

Se construyó con los datos de los SEV 35, 36, 14, 20, y 25. Su longitud es de 7.65 Km., ubicándose entre las poblaciones de Huejotzingo y la Col. José Ángeles. En esta sección se identificaron seis unidades geoeléctricas.

f) Pseudosección Geoeléctrica F-F'

Esta pseudosección se realizó procesando la información de los SEV 35, 36, 18, 37 y 24, con dirección NW-SE, iniciándose al oriente de la población de Huejotzingo y terminando al SW de la población de San Antonio Mihuacan, su longitud es de 8.2 Km. y se identificaron 5 unidades geoeléctricas.

g) Pseudosección Geoeléctrica G-G'

Se inicia al oriente de la ciudad de Huejotzingo y termina en la población de San Francisco Ocotlán, tiene una longitud total de 12.3 Km identificándose seis unidades geoeléctricas.

Como resultado de las pseudosecciones anteriores tenemos las unidades geoelectricas que se describen en el cuadro 2.2

Cuadro 2.2 Unidades Geoelectricas en: A-A', B-B', C-C' D-D', E-E', F-F', y G-G'.

Unidades	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Características	Espesor (m)
U ₁	A	Toba areno arcillosa, toba limo arcillosa, permeabilidad de baja a media. Se correlaciona con la formación Tarango	15
	B		70
	C		
	D		
	E		17
	F		
	G		
U' ₁	A	Limos arenas y gravas de permeabilidad baja a media	80-90
	B		15-20
	C		15
	D		90
	E		
	F		
	G		
U ₂	A	Arena gravas y basaltos Con permeabilidad alta Pertenece a la formación Tarango	250
	B		
	C		
	D		
	E		
	F		
	G		
U' ₂	A	Derrames basaltos y escorias volcánicas de alta permeabilidad pertenece a la formación Tarango	10
	B		
	C		
	D		
	E		
	F		
	G		
U'' ₂	A	Calizas y travertinos típicos de la ciudad de Puebla y solo identificados en los sev cercanos a esta	20
	B		
	C		
	D		
	E		
	F		
	G		
U ₃	A	Arenas y gravas del Cuaternario inferior y basaltos de alta	30
	B		50 - 160
	C		300
	D		110

	E	22 - 221	permeabilidad	220
	F	41 - 1253		170
	G	22 - 122		170
U ₃	A	9 - 38	Tobas limo arenosa del Cuaternario, con permeabilidad de media a baja contiene arcilla, parte del acuífero que se explota actualmente	250
	B	16 - 25		80 - 130
	C	10 - 14		160
	D	11 - 30		220
	E	16 - 42		230
	F	14 - 20		190
	G	16 - 42		40 - 110
U ₄	A	3 - 12	Arcillas lacustres de edad Pliocénica, existen fallas Permeabilidad muy baja frontera con el basamento	50 - 170
	B	5 - 8		170
	C	9		110
	D	3 - 10		40 - 110
	E	6		130
	F	9		150
	G	3 - 9		200
U ₅	A	106 - 438	Basaltos, flujos piroclásticos de permeabilidad media a alta, potencial hidráulico	80 - 90
	B	113 - 269		70 - 90
	C	262 - 297		120
	D	81 - 83		50 - 120
	E	269		50 inferido
	F	82 - 269		120
	G	104 - 395		60
U ₆	A	35 - 85	Conglomerados que se originaron en el Eoceno Formación Balsas de baja Permeabilidad, de poca Importancia hidrogeológica	Basamento
	B			
	C			
	D			
	E			
	F			
	G	1000 - 1047		
U ₇	A	1047 - 2582	Rocas calizas del Cretácico, basamento geohidrológico regional muy baja permeabilidad	Basamento
	B	1565		
	C			
	D	1000 - 1142		
	E	1142		
	F			
	G	1000-1047		

A = sección A-A'

D = sección D-D'

G = sección G-G'

B = sección B-B'

E = sección E-E'

C = sección C-C'

F = sección F-F'

Las características descritas en el cuadro 2.2 se basaron en la estratigrafía de la cuenca (sección 1.5 y 1.6).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

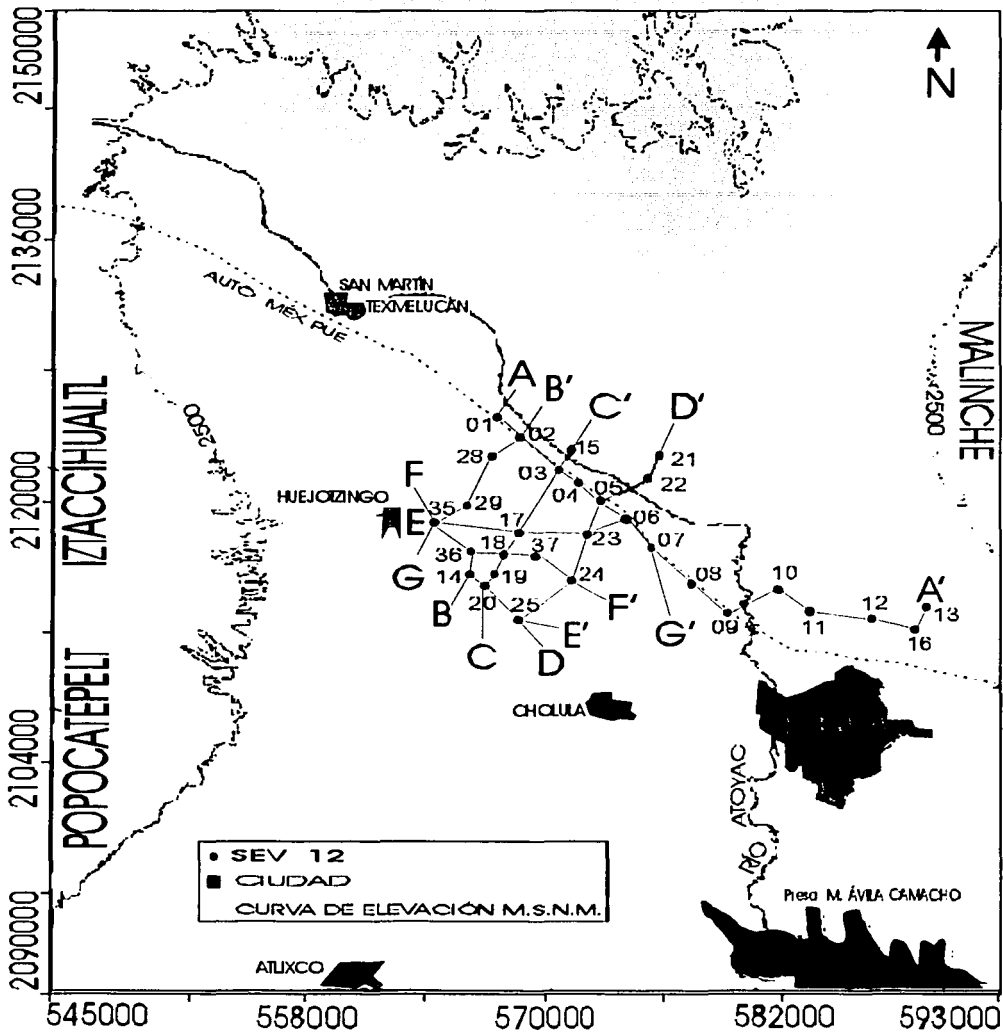
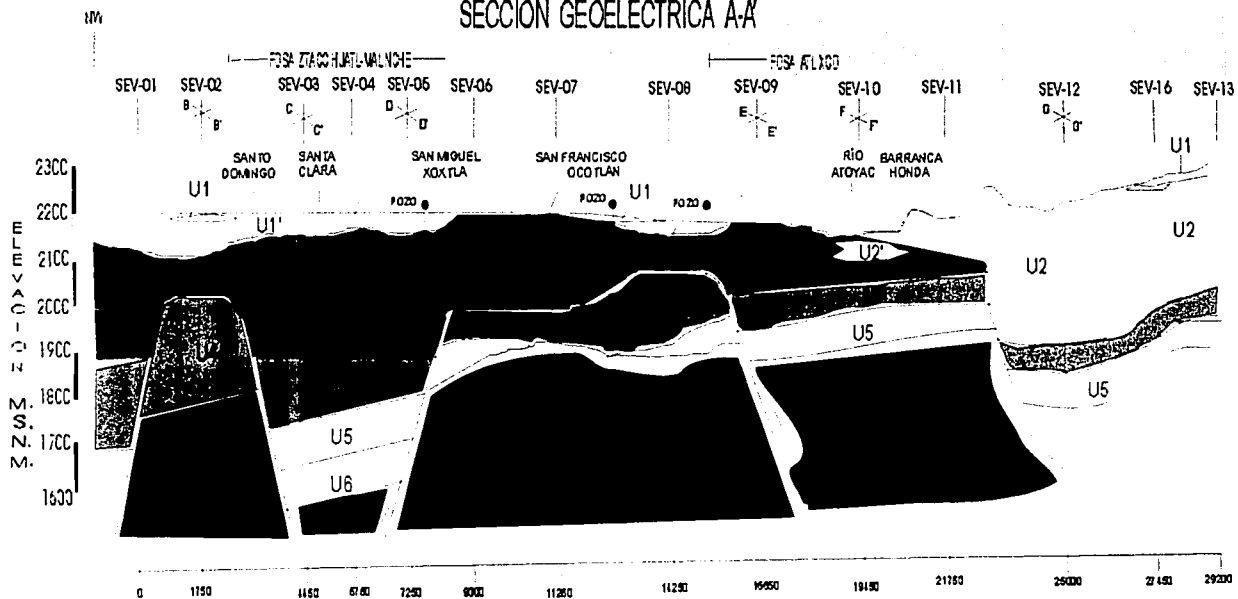


Figura 2.1 Ubicación de las Pseudosecciones Geoeléctricas en la zona de Xoxtla

La representación geométrica de las unidades para la pseudosección A-A' se presenta en la figura 2.2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SECCIÓN GEOELÉCTRICA A-A'



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 2.2 Sección Geoelectrica A-A'
MODIFICADO DE: SISTEMA OPERADOR DE LOS
SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y
ACANTARILLADO DEL MUNICIPIO DE PUEBLA
"SOAPAP" GEOTECNOLOGIA, S.A.

LEYENDA	
SONDEO ELECTRICO VERTICAL	--- SEV 13
CONTACTO GEOELECTRICO	---
DISCONTINUIDAD ELECTRICA	---
RESISTIVIDAD EN OHR-METRO	22
CONTACTO GEOELEC. INFERIDO	---
FALLA GEOLOGICA INFERIDA	---
POZO	●

Es importante aclarar que la unidad U_1 no se contemplará al realizar el modelo numérico ya que ésta sólo aparece porque el estudio es local. No así las unidades U_2 , U_3 y U_4 que definen al acuífero en explotación y al basamento respectivamente; en el estudio regional (cuadro 2.2 y cuadro 2.3) éstas últimas se identifican con otro nombre U'_3 , U_3 , U_2 conformando la capa 1. Las unidades U_4 y U_5 conforman la capa 2, por último U_6 , y U_7 para la base de la capa 3 al definir la malla del modelo.

2.3.3 Localización del área de Barranca Honda

Esta se localiza al NW de la ciudad de Puebla, entre las poblaciones de Barranca Honda, Tenancingo, Santo Toribio Xicotzingo y San Francisco Ocotlán. La zona se cubrió con cinco pseudosecciones geoelectricas que se identifican en la figura 2.3

a) Pseudosección Geoelectrica H-H'

Esta pseudosección se inicia en la población de San Francisco Ocotlán y termina al sur de la población de José María Morelos, con una longitud de 10.35 Km. Se identificaron seis unidades geoelectricas con base al procesamiento e interpretación de la información de los SEV's: 7, 26, 31, y 33.

b) Pseudosección Geoelectrica I-I'

Se localiza entre las poblaciones de San Francisco Ocotlan y Tenancingo, con una longitud de 8.5 Km. y la conforman los SEV's: 8, 27, 32, y 34. Se identifican ocho unidades geoelectricas.

c) Pseudosección Geoelectrica J-J'

Se inicia desde San Toribio Xicohtzingo a la fábrica de autos Volkswagen, tiene una longitud de 7.42 Km. y es conformada por los sondeos 30, 27, y 9 de cuya interpretación se definen siete unidades geoelectricas.

d) Pseudosección Geoelectrica K-K'

Se inicia en Santo Toribio Xicohtzingo y termina en la población de Ignacio Zaragoza. Tiene una longitud de 5.9 Km.

e) Pseudosección Geoelectrica L-L'

Esta pseudosección se inicia al sur de la población José María Morelos y termina en San Sebastián Aparicio con una longitud de 9.20 Km. Se identificaron tres unidades geoelectricas con base en los resultados de los SEV's: 33, 34, 12, y 16. Como resultado de las 5 pseudosecciones anteriores tenemos las unidades geoelectricas que se describen en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3 Unidades Geoeléctricas en: H-H', I-I', J-J', K- K', y L-L'.

Unidades	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Características	Espesor (m)
U ₁	H	Materiales limo arenoso, permeabilidad de baja a media. Depósitos del Cuaternario reciente	25
	I		30
	J		
	K		
U ₂	H	Se asocia a basaltos, escorias volcánicas de la Formación Tarango, alta permeabilidad; arenas y gravas	120
	I		120
	J		170
	K		80 - 230
U ₂	H	Se asocia a travertinos y calizas de origen lacustre típico de la ciudad de Puebla	18
	I		
	J		
	K		
U ₂	H	Material de transición de la unidad U ₂	40
	I		
	J		
	K		
U ₃	H	Tobas limo arenosas de media a baja permeabilidad. Depósitos del Cuaternario reciente. limos y arena con alta permeab.	220
	I		180
	J		100 - 300
	K		13 - 25
U ₄	H	Arcillas de baja permeabilidad de origen lacustre del Plioceno Sedimentos arcillosos	150
	I		170
	J		140
	K		140
U ₅	H	Rocas de tipo andesítico de edad Terciaria con permeabilidad alta	70
	I		50
	J		100
	K		50
U ₆	H	No aflora	No aflora
	I		
	J		
	K		
U ₇	H	Calizas de edad Cretácica con baja permeabilidad, es el basamento geohidrológico regional U ₇	Basamento
	I		
	J		
	K		
U ₇	H	No aflora	No aflora
	I		
	J		
	K		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

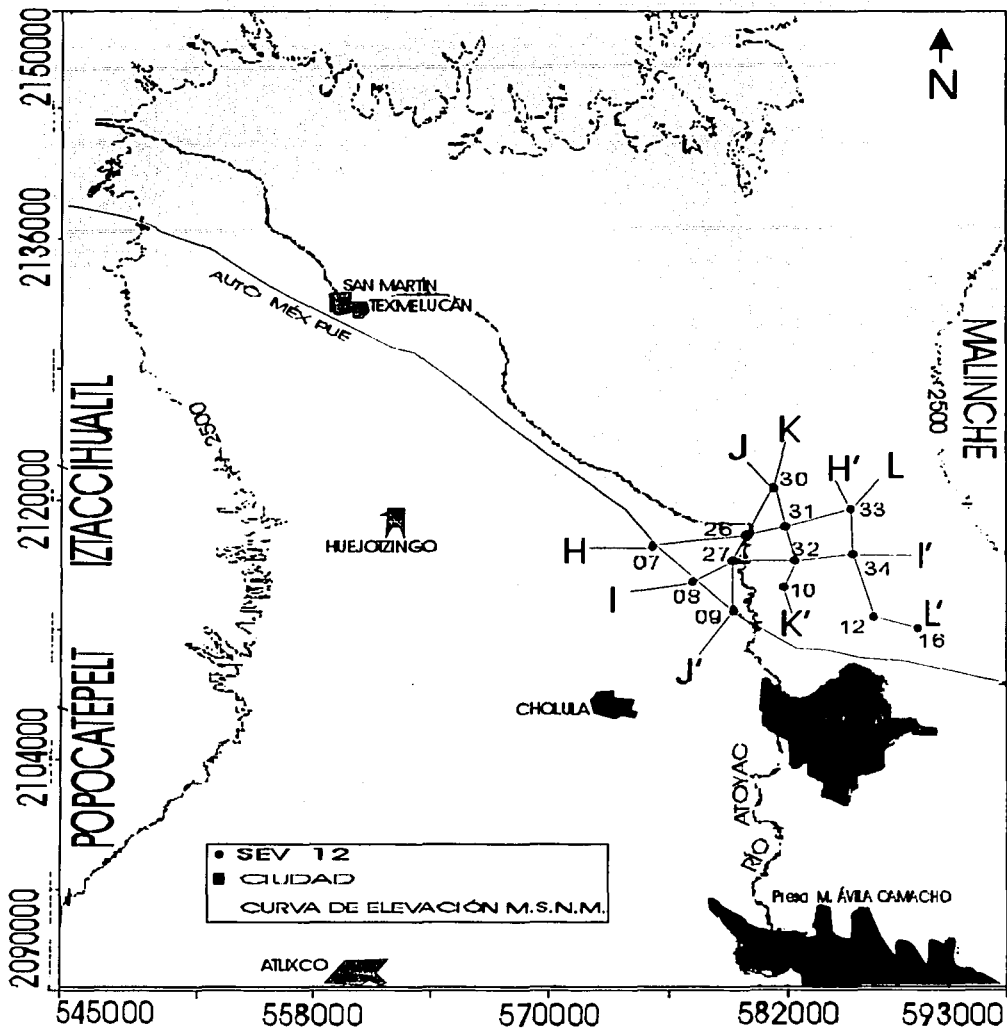


Figura 2.3 Ubicación de las Pseudosecciones Geoléctricas en la zona de Barranca Honda

La representación geométrica de las unidades para la pseudosección B-B' y C-C', se presenta en la figura 2.4.

Figura 2.4 Sección Geoelectrónica B-B' y C-C'.

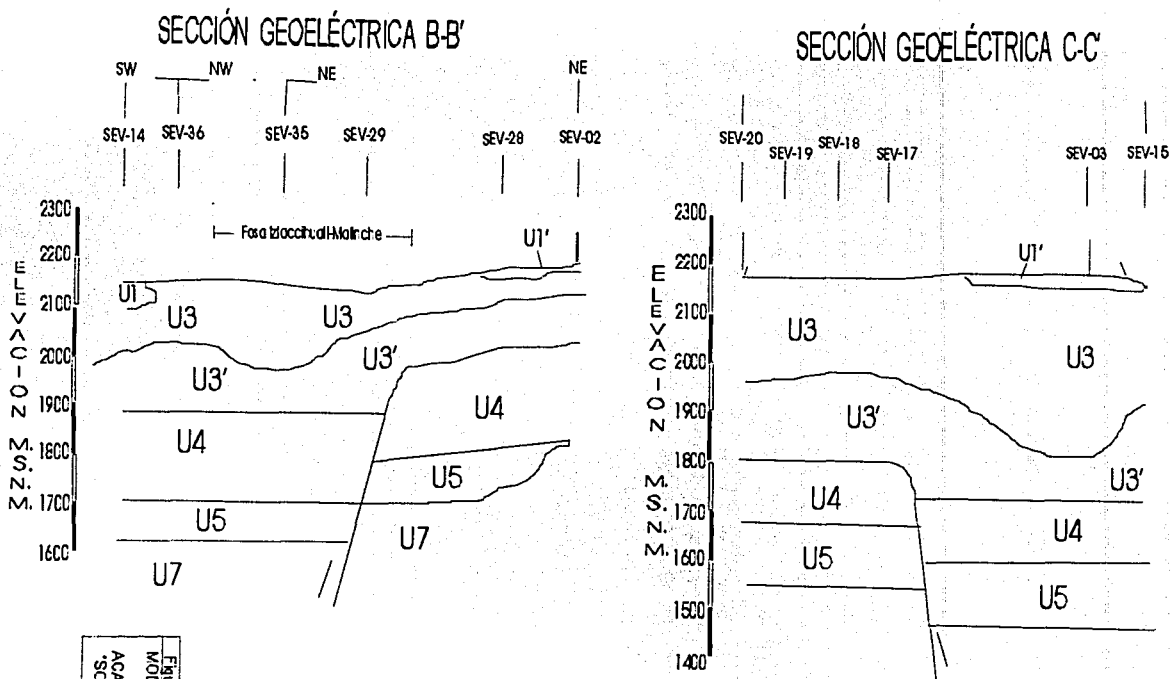


Figura 2.4 Sección Geoelectrónica B-B' y C-C'
 MODIFICADO DE: SISTEMA OPERADOR DE LOS
 SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y
 ACANTARILLADO DEL MUNICIPIO DE PUERBA
 'SOAPAP' GEOTECNOLOGIA, S.A.

LEYENDA	
SONDEO ELECTRICO VERTICAL	--- SEV 13
CONTACTO GEOELECTRICO	-----
DISCONTINUIDAD ELECTRICA	~
RESISTIVIDAD EN OHM-METRO	22
CONTACTO GEOELEC. INFERIDO	///
FALLA GEOLOGICA INFERIDA	///
POZO	●

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

2.4 Conclusiones

Los estudios de sondeos eléctricos verticales previamente descritos hacen posible la creación del perfil A-A' de la sección 2.3.2, considerando 14 SEV. Este perfil atraviesa transversalmente la cuenca (figura 2.2) en el podemos observar que la distribución de la corriente eléctrica en el subsuelo no es homogénea, presentándose variaciones tanto en profundidad como lateralmente. Es muy importante aclarar que éste último perfil es diferente de la línea A-A', que aparece en la sección 2.2, y describe a un estudio local dentro de la ciudad de Puebla.

Las características eléctricas del subsuelo nos permitieron agrupar unidades de valores resistivos semejantes, y de acuerdo a esto se tienen 7 unidades, denominadas U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , U_5 , U_6 y U_7 las cuales se correlacionaron con formaciones geológicas (geohidrológicas), basándose en columnas litológicas con pozos y observaciones en superficie, ver apéndice 1.

Bajo las características descritas en éste capítulo y en el anterior se tiene información tal como: pseudosecciones geoelectricas, espesor y profundidad de las unidades hidrológicas. Al reunir toda esta información se cuenta con los elementos necesarios para generar un modelo matemático que aproxime el comportamiento del sistema acuífero.

CAPITULO III SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES DE FLUJO Y TRANSPORTE

3.1 Introducción

Dada la importancia que tiene la ecuación de flujo y transporte en la modelación de acuíferos, estas han sido tratadas desde varios enfoques. La solución de las ecuaciones, se ha manejado abordando el problema desde un punto analítico hasta el numérico. Cuando se le trata analíticamente su campo de aplicación se muestra muy reducido debido principalmente a todas las restricciones que se tienen que imponer a las propiedades del medio, a las condiciones de frontera y a las condiciones iniciales para poder llegar a una solución. Sin embargo, es de gran importancia la solución analítica debido a su exactitud y por ello sirve como base para validar las soluciones numéricas de dichas ecuaciones. Estas últimas han permitido tratar problemas prácticos de mayor complejidad; como los medios anisotrópicos y heterogéneos, con condiciones iniciales y de frontera complicadas.

En el modelo que se elaboro sólo incorporamos la parte concerniente al flujo y no así para el transporte. Sin embargo el tratamiento de la ecuación diferencial parcial que describe físicamente al agua subterránea tiene acoplados a los elementos de flujo y transporte.

3.2 Evolución de los modelos de flujo y transporte

Sea el tratamiento de la ecuación de flujo, acoplada a la ecuación de transporte, en la década de los sesentas se desarrollaron aplicaciones de la ecuación de transporte básicamente en forma analítica (Ber, 1961; Harleman y Rumer, 1962; Bachmat, 1967).

Aparecen las primeras soluciones numéricas para la ecuación de transporte (Shamir y Harleman, 1967). Luego para los años setentas comienza un rápido desarrollo en las aplicaciones de la ecuación de flujo y transporte. El acelerado desarrollo de la computación en hardware y software, permitió extender las aplicaciones para modelar sistemas más complejos.

El avance numérico de la simulación de flujo influye positivamente en el desarrollo de la simulación numérica del transporte de contaminantes. El manejo de modelos de flujo tridimensionales, y la incorporación de la aplicación de los métodos de elemento finito a la discretización de las ecuaciones diferenciales correspondientes, permitió el manejo de heterogeneidades macroscópicas en los modelos de transporte y condujo al reconocimiento general de éstas, como la causa primaria de la dispersión en problemas a escala real (Schwartz, 1977). Además se inició la aplicación del análisis estocástico para modelar flujo y transporte en agua subterránea (Freeze, 1975).

Diversos trabajos han generado el desarrollo de modelos computacionales prácticos de flujo y transporte que, actualmente, son de uso común tanto en el ámbito científico como en el empresarial. Los más populares son: USGS MOC (Konikow y Bredehoeft, 1978), USGS SUTRA (Voss, 1984) y MT3d (Zheng, 1990, 1992).

3.3 Formulación Euler-Lagrange de la ecuación de flujo

La ecuación de flujo subterráneo para un medio saturado y transitorio (que depende del tiempo) es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

donde

h = carga hidráulica

K_x , K_y , K_z son los componentes de la conductividad hidráulica saturados en las coordenadas direccionales x , y , z

t = tiempo

S_s = coeficiente de almacenamiento específico

(Istok, 1989)

La ecuación de transporte subterráneo para un medio no saturado es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

donde

ψ = presión de carga

$K_x(\psi)$, $K_y(\psi)$, $K_z(\psi)$ son los componentes no saturados de la carga hidráulica

$C(\psi)$ = capacidad específica de humedad

(Istok, 1989).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4 Breve historia del MODFLOW

Es el código de modelación del flujo tridimensional en diferencias finitas que se ha convertido en el estándar para la modelación de acuíferos. La versión original fue desarrollada con una muy amplia guía del usuario y publicada en 1984; posteriormente en 1988 fue remplazada (McDonal and Harbaugh).

El éxito de este código puede ser atribuido a cuatro factores:

- 1.- Constituye un producto poderoso, robusto y muy bien diseñado que facilita su aplicación exitosa en gran variedad de problemas prácticos.
- 2.- La guía del usuario es extremadamente detallada, proporcionando descripciones claras para el empleo de las opciones
- 3.- Cuenta con el apoyo de U.S Geological Survey
- 4.- La versión original favoreció la creación de cursos de capacitación así como la aparición de un gran número de productos y módulos relacionados.

Actualmente existen diversas compañías que venden versiones recientes y tienen software disponible para ayudar en la preparación de datos que utiliza el modflow. Se utiliza para simular condiciones de flujo estacionario y transitorio en un sistema de forma irregular en el que las capas del acuífero pueden ser confinadas, no confinadas o una combinación de ambas. Las conductividades hidráulicas y las transmisividades pueden presentar variaciones espaciales para cualquier capa y ser anisotrópicas, el coeficiente de almacenamiento puede ser heterogéneo. El modelo requiere ingresar la relación de conductividad hidráulica vertical para la distancia entre bloques adyacentes verticalmente centrados. La carga y las fronteras de flujo especificadas pueden ser simuladas como un flujo dependiente de la carga a través de las fronteras externas del modelo, lo que permite aportar agua a las fronteras en el área modelada en un valor proporcional a la diferencia de carga actual entre una "fuente" de agua localizada fuera del área modelada y la frontera.

Visual MODFLOW está constituido con un diseño modular que consiste de un programa principal y "paquetes". Estos paquetes son grupos de subrutinas independientes que realizan tareas específicas del modelo, tales como: asignación de valores en las fronteras, evolución en el tiempo, balance de flujo, inyección o descarga a través de pozos, calcular el flujo hacia o desde un río, recarga por precipitación, drenes, flujo variable a través de las fronteras, elementos que solucionan ecuaciones (SOR, SIP), entre otras.

Este diseño modular es muy útil porque simplifica la preparación de los datos para las pruebas de simulación. En su versión actual los datos son leídos directamente por ventanas de diálogo interactivas. Además tiene varios formatos de salida, que van desde el gráfico, que permite el despliegue inmediato de los modelos que se están procesando, hasta la salida en forma de archivos ascii, de las soluciones calculadas en cada nodo de las mallas del modelo.

3.4.1 Método

La ecuación de flujo se resuelve utilizando una aproximación en diferencias finitas en un medio poroso considerado como una región dividida en bloques, cuyas propiedades son consideradas uniformes.

En planta, la región discretizada se convierte en una malla de celdas rectangulares en las que el espaciamiento puede variar. El espesor variable de las capas se transforma en un conjunto de estratos paralelos; de los diversos elementos disponibles que resuelven la matriz asociada, se debe elegir el más viable para cada problema particular. Los balances de masa se calculan para cada período de tiempo como un volumen acumulativo de cada fuente y cada descarga.

3.4.2 Visual MODFLOW

En el año 1994, la empresa Waterloo Hydrogeologic Inc. publica por vez primera el código Visual MODFLOW, basado en el programa original de McDonald and Harbaugh, y se convierte en el estándar mundial para la modelación de flujo y transporte de contaminantes, gracias al apoyo de USGS y USEPA.

El Visual MODFLOW es el código de modelación más completo y fácil de utilizar en la aplicación práctica de simulaciones tridimensionales de flujo de agua subterránea y transporte de contaminantes, ya que tiene integrados los módulos MODFLOW, MODPATH Y MT3D soportados por la más poderosa e intuitiva interfase gráfica disponible. El diseño innovador del menú principal permite la fácil discretización del dominio, seleccionar unidades, asignar convenientemente propiedades y condiciones de frontera, correr el modelo (eligiendo los módulos deseados), calibrar el modelo y visualizar los resultados con líneas de contorno o sombras de color.

Posteriormente, esta misma empresa ha actualizado la versión original, mejorando la interfase gráfica y adicionando paquetes acoplados (MT3D, PEST, etc.) a través de las versiones 2.6, 2.7, 2.8.1 y 2.8.2. el nuevo 3.0 cuenta con la apreciación global de los detalles visuales 3D, observación y animación.

El paquete Visual MODFLOW ha sido diseñado para aumentar la productividad en la modelación numérica y disminuir la complejidad de la construcción de mallas tridimensionales y de entrada de datos. Este paquete ha sido probado para modelos 3D de agua subterránea con transporte de contaminantes. Visual MODFLOW Pro combina los paquetes MODFLOW-2000, MODPATH, MT3DMS y RT3D.

La integración anterior nos permite:

1. condicionar gráficamente la malla, las propiedades y los límites,
2. visualizar los parámetros de entrada en dos - o tres-dimensiones,
3. hacer simulaciones, corridas independientes o conjuntas de: flujo del agua subterránea y contaminantes,
4. con el uso de WinPEST se puede realizar una calibración automática

5. el explorador-3D que usa Visual MODFLOW despliega e interpreta los resultados modelados en espacio tridimensional (vista en planta por estratos y cortes bidimensionales en renglones o columnas de la malla).

Gran parte del éxito de este paquete comercial se debe a sus bajos requerimientos de equipo de computo; una computadora tipo pentium PC compatible es suficiente para desarrollar modelos de buena resolución. Además, la interface gráfica del paquete Visual MODFLOW permite gran interacción del usuario con el paquete, ya que todos los parámetros son inmediatamente visualizables desde su entrada, tanto por isolíneas como por códigos de color. Otra ventaja es que mallas tipo GRD provenientes del paquete comercial Surfer son fácilmente leídas por MODFLOW.

Algunas desventajas del paquete están ligadas a las condiciones de frontera y a la calidad de los datos reales de las zonas a modelar.

Algunos de los métodos más conocidos para resolver sistemas de ecuaciones son:

LINEALES	NO LINEALES	DIFERENCIALES
DIRECTOS	Punto Fijo	Taylor
Eliminación Gaussiana	Newton-Raphson	Runge-Kutta
Gauss-Jordan	De la secante	Predicor-Corrector
Descomposición L-U	Bisección	Diferencias Finitas
Cholesky	De Gradiente	Elemento Finito
Crout		
INDIRECTOS		
Jacobi		
Inversión de Matrices		
Sobrerrelajación (SOR)		
Gauss-Seidel		

Para los fines de modelación y particularmente para el caso de la familia de códigos MODFLOW, se utiliza el método de Diferencias Finitas para resolver la ecuación diferencial parcial que gobierna el flujo subterráneo.

Como opciones para resolver sistemas de ecuaciones en Modflow se tienen cuatro métodos:

PCG2 Gradiente Conjugado Precondicionado. A través de él se pueden simular condiciones de flujo lineal y no lineal e incluye dos opciones de precondicionamiento: Cholesky modificado incompleto y polinomial. La

convergencia de este método es determinada usando el cambio de carga y el criterio residual. Los problemas no lineales son resueltos usando iteraciones Picard.

SIP. Procedimiento Fuertemente Implícito. Es un método para resolver grandes sistemas de ecuaciones lineales simultáneas por iteración. La ventaja que tiene es su gran estabilidad y generalmente converge a una solución, aunque de manera muy lenta. No es tan rápido como el PCG2, pero requiere de menor capacidad de memoria en la computadora. Debido a que cada ecuación involucra a más de siete valores desconocidos de carga y que el conjunto de valores cambia de una ecuación hacia la siguiente a través de la malla, las ecuaciones deben ser resueltas simultáneamente para la malla completa en cada paso de tiempo.

SOR. Sobre-Relajación Sucesiva. Se utiliza también para resolver grandes sistemas de ecuaciones lineales por medio de iteraciones. Es implementado dividiendo la malla de diferencias finitas en "rebanadas" verticales y agrupando las ecuaciones nodo en conjuntos discretos, cada uno de los cuales corresponde a una rebanada. En cada iteración, estos conjuntos son procesados resultando un nuevo conjunto de valores estimados de carga para cada rebanada; El conjunto de ecuaciones correspondientes a la rebanada es entonces resuelto entonces por eliminación Gaussiana, tratando los términos para rebanadas adyacentes como valores conocidos.

WHS. Waterloo Hydrogeologic. Utiliza una rutina de gradiente Bi-Conjugado Estabilizado (Bi-CGSTAB) implementada con descomposición incompleta para acondicionamiento de ecuaciones diferenciales parciales de flujo subterráneo. Este método, como todos los solucionadores iterativos, aproxima la solución de un gran conjunto de ecuaciones diferenciales iterativamente a través de una aproximación.

Debido a que la matriz de ecuaciones de flujo subterráneo es inicialmente "mal condicionada" se necesita un procedimiento efectivo de estas matrices para lograr una solución eficiente. Contiene dos "niveles" de factorización. Aunque para el nivel de factorización uno el método requiere menor número de iteraciones para lograr la convergencia, la memoria necesaria es mayor. También, el trabajo por iteración se incrementa con el nivel de factorización 1m, tanto que el tiempo total para la solución puede no ser menor que el tiempo necesario para el nivel de factorización cero.

CAPÍTULO IV MODELO DE FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO

El modelo físico o conceptual de un sistema hidrogeológico es la caracterización de sus rasgos, componentes y funcionamiento.

Para el desarrollo de este trabajo, fue necesario disponer de una herramienta con la capacidad de integrar todas las variables que intervienen en el modelo conceptual del sistema acuífero, además que permitiera visualizar los cálculos realizados de manera rápida. Por ello, se utilizó el programa Visual MODFLOW v.2.8.1.123 (WHI, 1999). Este programa resuelve la ecuación que rige el movimiento de agua subterránea (flujo y transporte sección 3.3), a través de una aproximación en Diferencias Finitas.

4.1 Características del modelo

Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Las cuatro categorías de información de entrada necesarias para construir un modelo son 1) las condiciones iniciales y de frontera; 2) la geometría del acuífero; 3) los parámetros del acuífero; y 4) la historia de recarga y descarga en el acuífero (Luckey *et al.*, 1986). Las limitaciones en los datos de entrada afectan la precisión y aplicación de los modelos.

La propiedad fundamental en que se sustenta la modelación de un sistema acuífero es la conductividad hidráulica o permeabilidad de una roca, que es su capacidad de permitir el paso de fluidos. Este coeficiente se verá afectado por el tamaño del grano, la geometría de los poros, la matriz, la diferencia de presión, la viscosidad del fluido y del tipo de flujo (Kazman, 1972).

La velocidad del fluido está determinada por una relación conocida como la ley de Darcy, la cual expresa que la velocidad del flujo (Q) a través de una sección transversal de área (A) del medio poroso, es directamente proporcional a la diferencia de alturas del agua (h), a esta diferencia se le denomina carga hidráulica ($\Delta h = h_1 - h_2$) y a su vez es inversamente proporcional a la longitud que recorre el flujo (L) (Fetter, 1994)

$$Q \propto h_1 - h_2 \quad \text{y} \quad Q \propto \frac{1}{L}$$

La expresión de la ley de Darcy se escribe:

$$Q = K \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta h}{L} \right)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$Q = K \cdot A \cdot \left(\frac{dh}{dl} \right)$$

donde Q es la velocidad de flujo, K es la conductividad hidráulica, A es el área de la sección transversal, dh es el cambio en la carga hidráulica y dl es la longitud.

La conductividad hidráulica está en función de las propiedades del medio poroso y del fluido que pasa a través de él, la unidad que define a la conductividad hidráulica es:

$$K = \frac{Q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)} = \frac{\frac{L^3}{T}}{L^2 \left(\frac{L}{L} \right)} = \frac{L}{T} = \left[\frac{m}{s} \right]$$

4.2 Geometría del Acuífero

La elaboración de la geometría del modelo se efectuó con base en: un mapa geohidrológico del estado de Puebla (figura 4.1), las columnas litológicas de los pozos de bombeo, y de la correlación de los horizontes resistivos (cortes geoelectricos) con dicha litología cuadros 2.1, 2.2, 2.3 respaldado por sondeos eléctricos verticales (ver capítulos I y II).

La topografía superficial del acuífero se tomó de la base de datos GEMA de INEGI, el basamento y las capas intermedias se definieron de acuerdo a las pseudosecciones geoelectricas (figuras 2.2 y 2.4), los flancos del acuífero se definieron por las zonas montañosas que bordean al Valle de Puebla. El mapa de la figura 4.1 muestra la extensión lateral del acuífero.

4.3 Definición de las capas (estratos) del modelo

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo II sección 2.3.2 existen tres unidades con potencial hidráulico a lo largo del valle U_3 , U_3 , U_2 que conforman la capa 1; U_4 y U_5 representan la capa 2 y U_6 , U_7 conforman la base de la capa 3 del modelo numérico. En el modelo numérico al definir el espesor y extensión para dichas unidades (figura 2.4 y 2.2), se tuvo que omitir la existencia de fallas abruptas ya que al discretizar las celdas, el código MODFLOW requiere que estas últimas estén conectadas, sin embargo la discretización de las capas es muy aceptable (sección 2.3.4).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

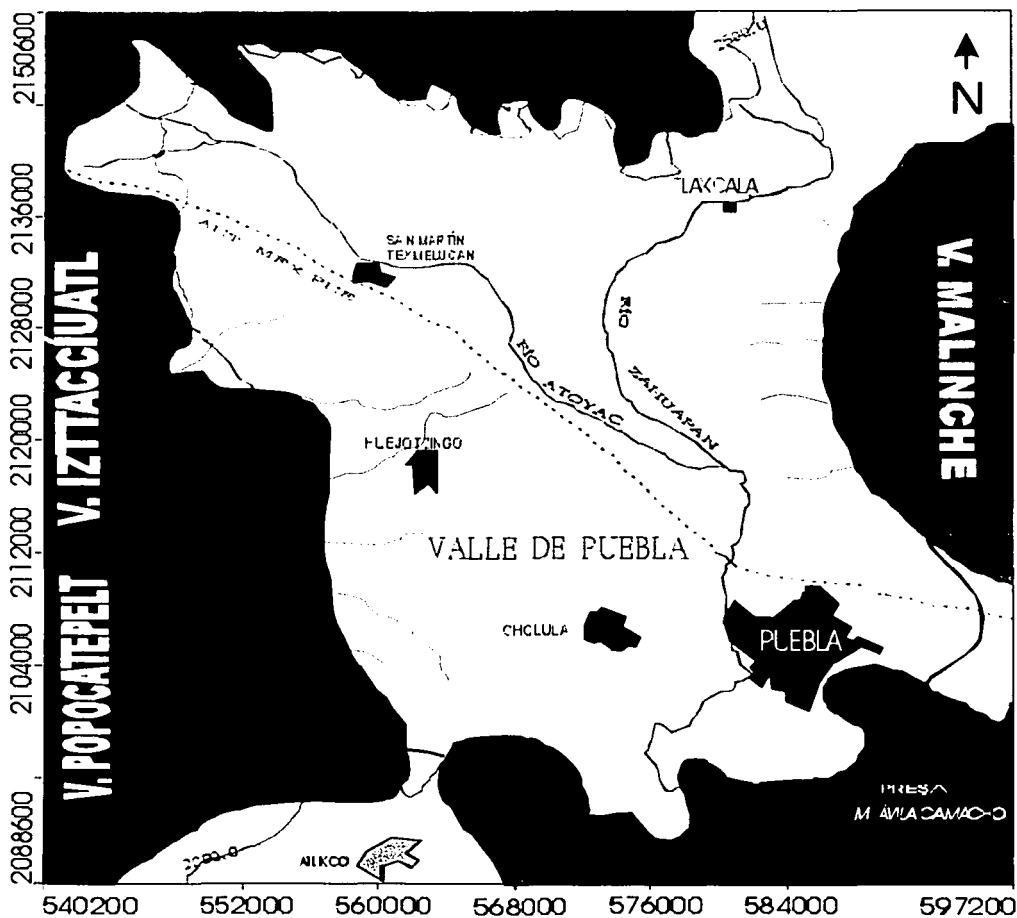


Figura 4.1 Delimitación del acuífero Valle de Puebla, modificado de "Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla" (SARH, 1992).

4.4 Tipo y orientación de la malla

Debido a las características del acuífero y considerando la orografía, al modelar se optó por construir y sobreponer en la superficie de interés, una malla en Diferencias Finitas de 57 columnas y 62 renglones, teniéndose un total de 3,534 celdas ó nodos con dimensiones de 1000 metros en la dirección 'x' y en la dirección 'y'; sin embargo solo 1490 celdas son las que participan en el proceso numérico de la modelación, el resto representan a las zonas montañosas que

constituyen las fronteras naturales que transmiten agua pero no la almacenan. Y por lo tanto las celdas que conforman a dicha zona son desactivadas y sus estribaciones representarían una condición de frontera.

La malla se orienta norte-sur coincidiendo con la pendiente topográfica. Los nodos que están al interior del acuífero son los nodos activos y participan en el cálculo de la simulación. Mientras que las celdas que pertenecen a las fronteras naturales del área a modelar son conocidos como inactivos (figura 4.2). El flanco de la Sierra Nevada y del volcán La Malinche en nuestro caso son dichas fronteras.

En la figura 4.3 se indican algunos renglones y columnas que posteriormente se presentan en las figuras 4.2 (a, b, c, d) y 4.2 (e, f, g, h) con la finalidad de mostrar un panorama sobre la configuración en columnas que se utilizó para la discretización de la cuenca de Puebla.

4.5 Asignación de los parámetros a las celdas (nodos) del modelo

Primero se asignó la información que permitiera caracterizar la estructura física del acuífero, a cada celda de la malla se le proporcionó un valor de elevación en la superficie y en su base, para las tres capas.

Ahora se definen las variables que permitan caracterizarlo hidrogeológicamente:

4.5.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (K) en este modelo se asignó a cada una de las capas geológicas de acuerdo con la geología superficial, las pseudosecciones geoelectricas (unidades con potencial hidráulico), esto se ilustra en la figura 4.5. Este parámetro es fundamental en las simulaciones de acuíferos; sus valores son estimados de acuerdo con el tipo de roca y de pruebas de bombeo de algunos pozos (Apéndice 1, tabla 8). Los valores de rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento (cuadro 4.4a) también se estiman; en el caso de la porosidad el programa asigna un valor constante.

4.5.2 Recarga

La cima de un modelo es tratado generalmente como un límite de volumen de flujo específico, para representar la recarga del acuífero, esta se asignó considerando el área de influencia de 11 estaciones climatológicas con valores que fluctúan de 800 a 1000 mm por año, desde la ciudad de Puebla hasta Tlaxcala. Los niveles de agua en algunas áreas (figura 1.7 y 1.8) del acuífero se han abatido considerablemente en los últimos 23 años; para éste trabajo se asignaron valores de 4.75 mm/año en cada celda, para coincidir (calibrar) con el cuadro 2.7 que es nuestra referencia.

4.5.3 Carga hidráulica

La carga hidráulica (los límites artificiales) se estableció de acuerdo con las observaciones que presenta la historia piezométrica, figuras 1.4, 1.5, y 1.6. Cabe destacar que este último dato base no es preciso ya que la interpolación fue lacónica y no se empleó un programa de interpolación numérica.

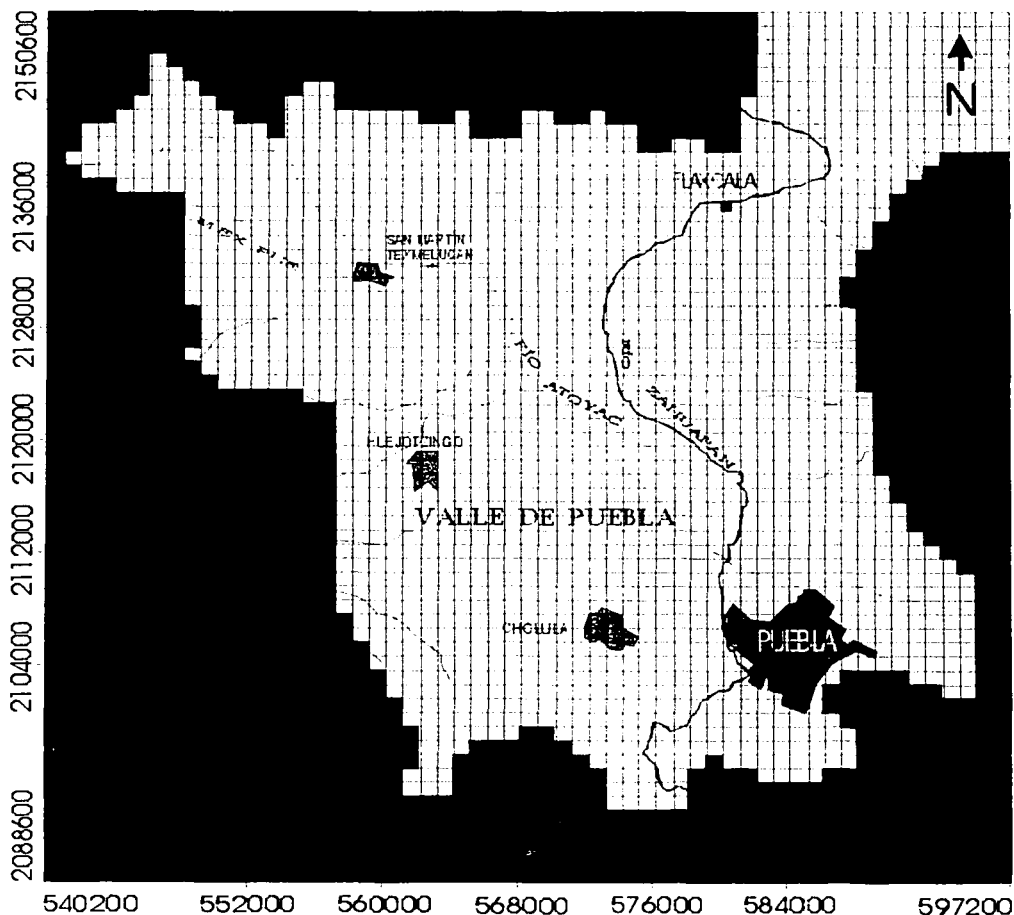


Figura 4.2 Celdas activas en blanco, celdas inactivas en color verde.

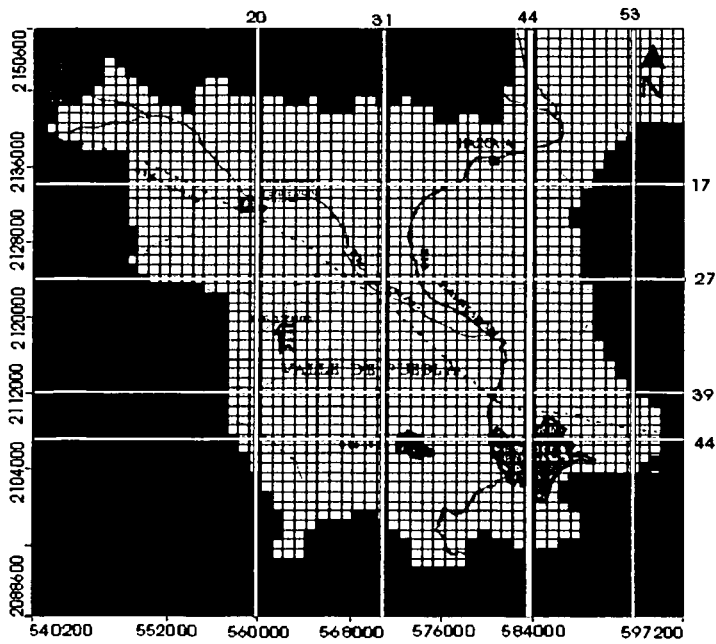


Figura 4.3 Renglon y columnas elegidos para mostrar su correspondiente sección.

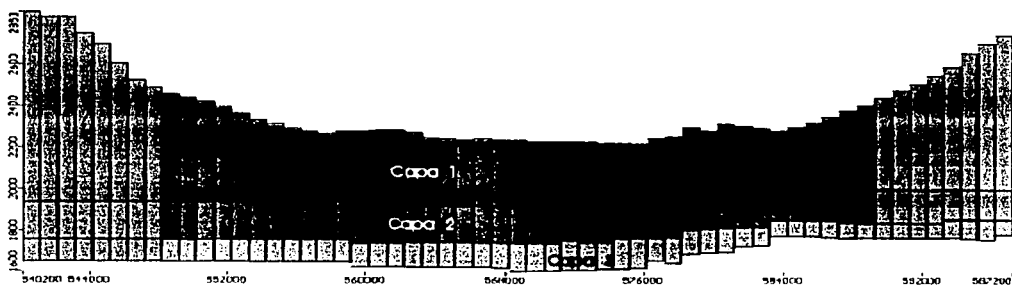


Figura 4.2a Renglon número 17.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

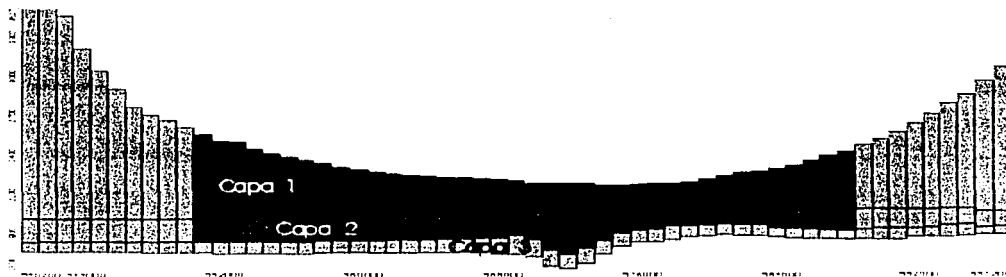


Figura 4.2b Renglón número 27.



Figura 4.2c Renglón número 39.

Además el decrecimiento tan grande de las curvas equipotenciales del nivel estático indican un efecto de no recuperación del nivel freático en los pozos de observación; de manera que éste parámetro no le podemos asignar una carga hidráulica igual que la proporcionada por las figuras antes citadas, por lo que el parámetro se asignó de acuerdo a la figura 4.4.

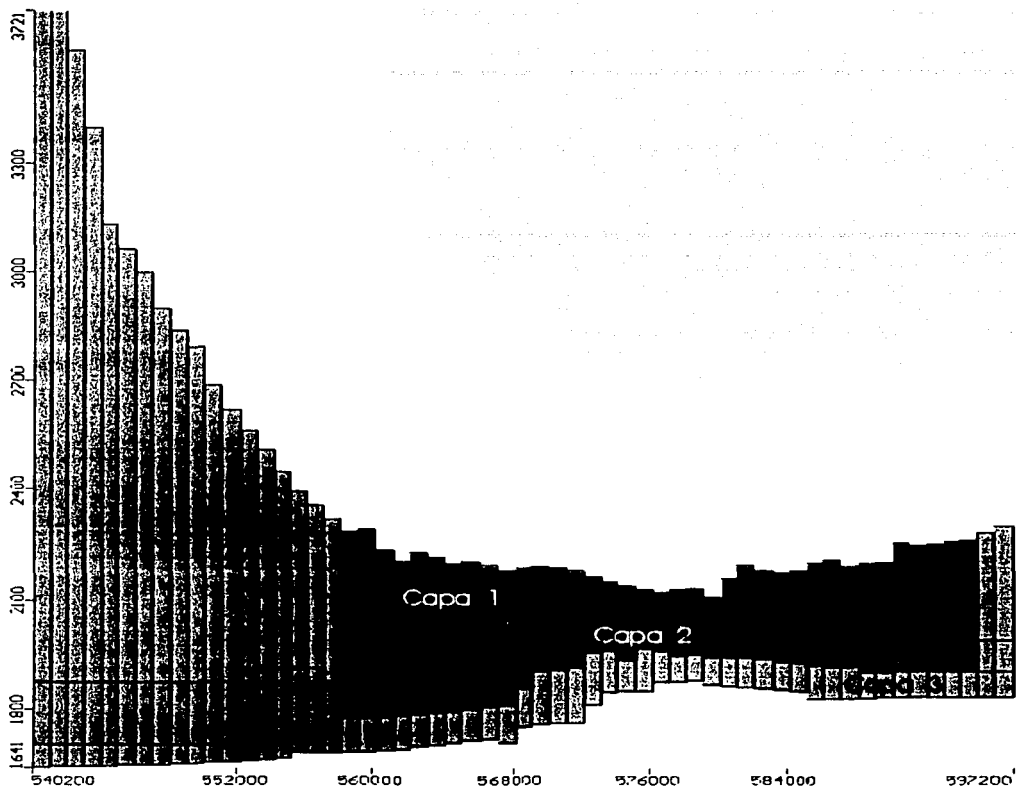


Figura 4.2d Renglón número 44.

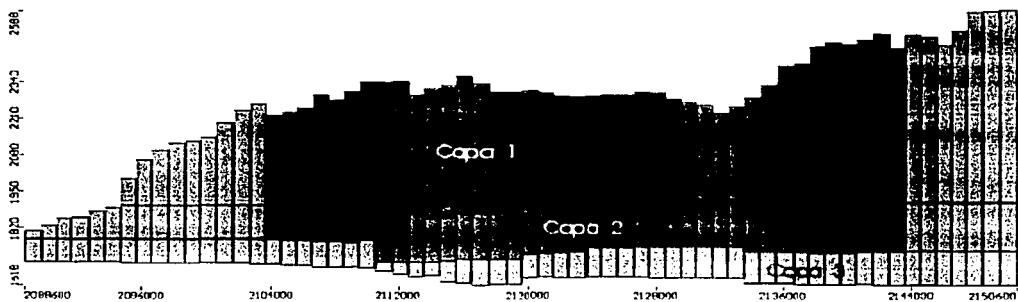


Figura 4.2e Columna número 20.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

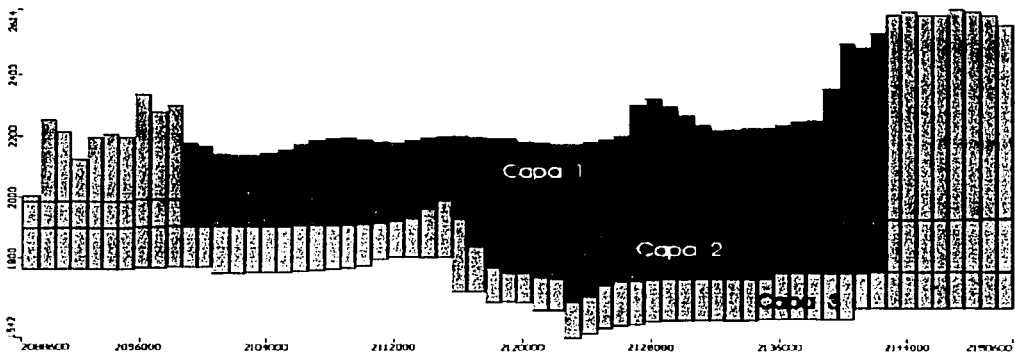


Figura 4.2f Columna número 31.

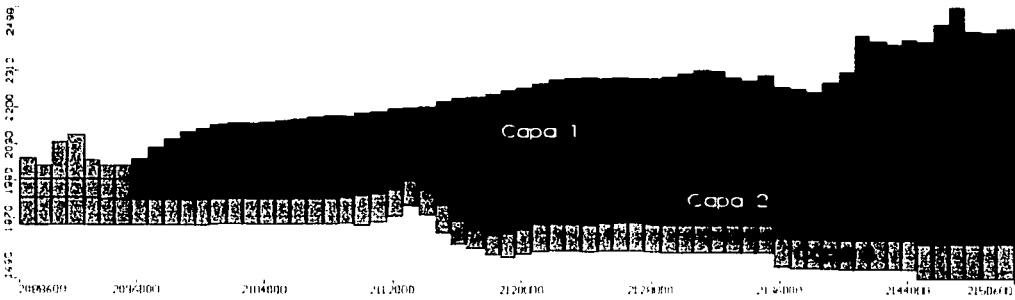


Figura 4.2g Columna número 44.

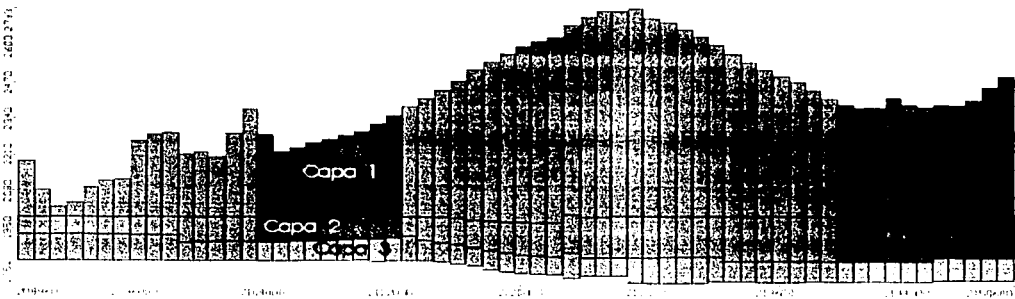


Figura 4.2h Columna número 53.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

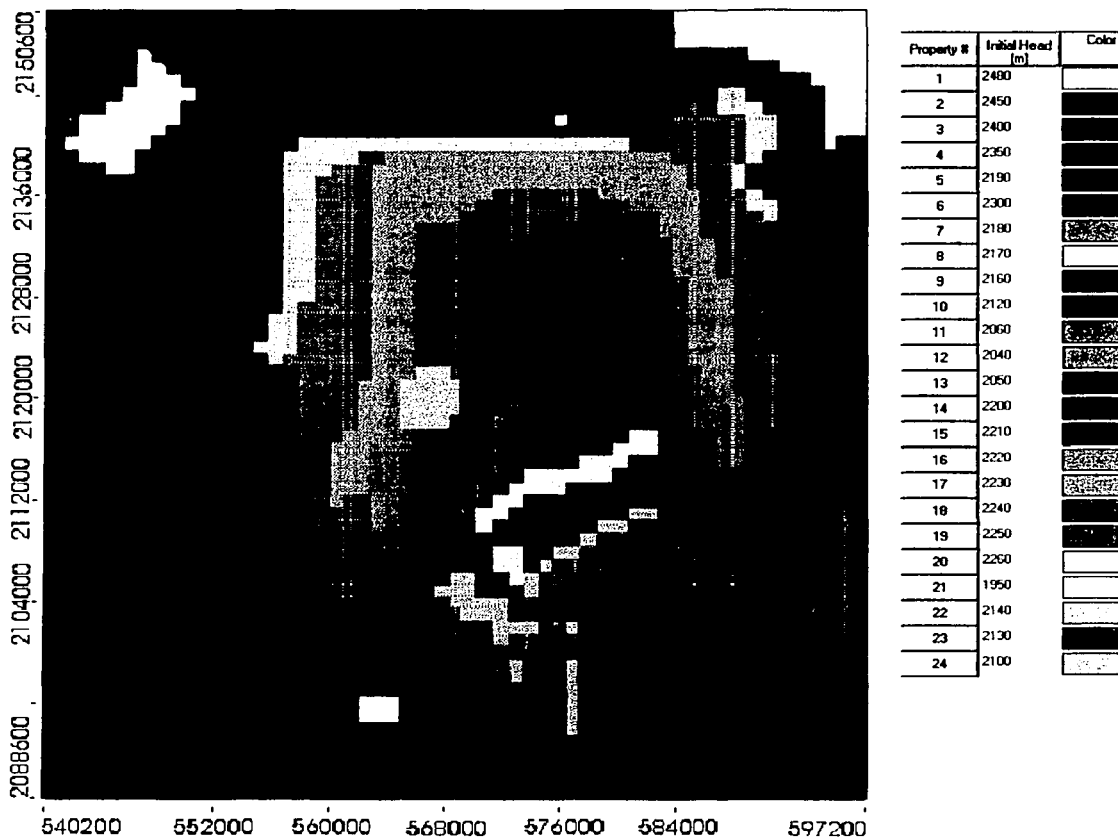


Figura 4.4 Discretización de la carga hidráulica para el año 1996.

4.5.4 El bombeo

Las estimaciones de la extracción de agua por bombeo son datos muy importantes para el modelado, especialmente para las predicciones de la reducción de nivel freático (Konikow, 1978). Otros esfuerzos potenciales en el acuífero incluyen el flujo de retorno por irrigación y la descarga por manantiales.

Para el parámetro de extracción de agua mediante pozos de bombeo, se recurrió a informes (Getecnología S.A. 1996-1997), cuadro 2.4 y cuadro 2.5. No es posible conocer con exactitud la posición y volumen de extracción en cada pozo, ya que

varios de ellos no están declarados ante las autoridades de la SOAPAP. Además algunos pozos han sido clausurados por la disminución en la calidad del agua.

De tal manera que la extracción total del agua se representó por 22 pozos repartidos en todo el valle con una extracción equivalente (310 Mm^3 , cuadro 2.7), la ubicación de estos pozos de extracción en el modelo se efectuó considerando al mapa elaborado por la CNA (figura 4.6). Finalmente para las áreas de mayor densidad de pozos emplazados en el valle se asignó la posición de los 22 pozos (figura 4.7).

El bombeo afecta la calibración del modelo y las predicciones de los niveles de agua en el futuro. La extracción con fines agrícolas se estimó con base en la cantidad de tierras irrigadas y la cantidad de agua necesaria para cultivar una cosecha determinada ver apéndice, sección 1. El cálculo de la evapotranspiración (ETP) se ha efectuó con 11 estaciones climatológicas con un valor medio anual de 1845 milímetros. El rango de ETP utilizado es de 106 Mm^3 y la explotación por bombeo, para el periodo de 1997 es de 312 millones de metros cúbicos.

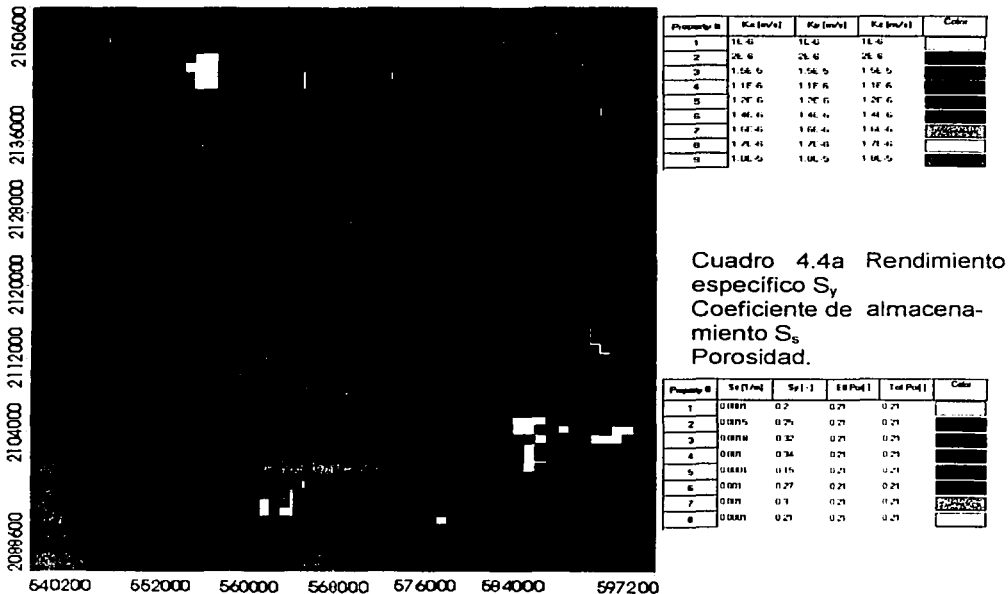


Figura 4.5 Discretización para la conductividad hidráulica.

En la figura 4.8a se muestra la incorporación de los pozos de bombeo con rango de extracción en diferentes periodos y su profundidad. Y en la figura 4.8b ilustra la incorporación de pozos de observación, en los cuales se proporciona el nivel piezométrico registrado con la finalidad de calibrar el modelo.

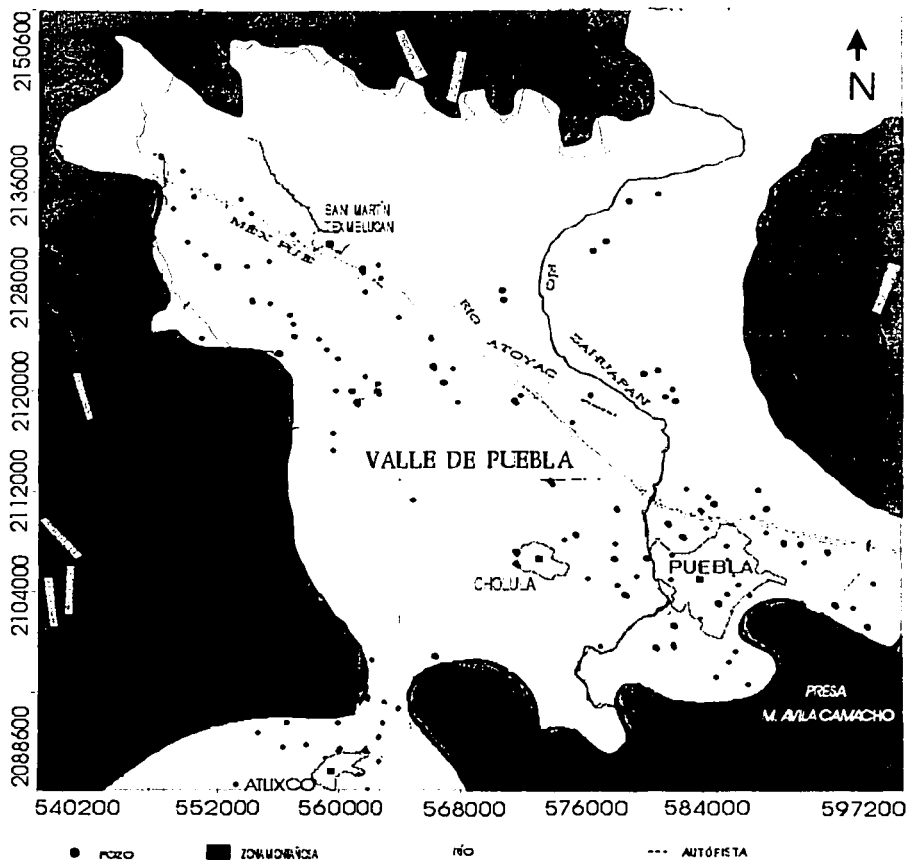


Figura 4.6 Ubicación de pozos de bombeo en el Valle de Puebla, modificado de 'Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla' (SARH, 1992).

4.5.5 Condiciones de Frontera

Los modelos numéricos resuelven la ecuación general del flujo y transporte de aguas subterráneas utilizando condiciones de frontera y condiciones iniciales específicas (una condición de frontera en un tiempo específico). Las condiciones de frontera incluyen los seis lados o flancos del acuífero modelado, aunque también se pueden aplicar límites internos como ríos o drenajes.

El modelo considera el basamento impermeable como un límite a través del cual no hay flujo, la misma consideración aplica para un límite de celdas inactivas.

Los límites laterales pueden colocarse en tres lugares: 1) en límites físicos, como el borde de una formación o un río; 2) en límites hidráulicos como un parte aguas y cauces de aguas subterráneas; y 3) en límites artificiales arbitrariamente colocados lejos del área de interés, al otro lado de los cauces. Las fronteras físicas pueden ser representadas por una variedad de condiciones, dependiendo del tipo de límite. Los límites hidráulicos son representados por fronteras a través de las cuales no hay flujo, mientras que los límites artificiales generalmente son representados por fronteras de carga constante.

En este modelo se utilizó la condición frontera de carga constante en el flanco este, oeste y norte para simular la descarga natural del acuífero. Así también se empleó una condición de frontera de río (Atoyac y Zahuapan) para simular la descarga de éste al acuífero; en la figura 4.7 se ilustran estas condiciones.

Los cuadros 4.1 y 4.2 indican los datos que empleamos en las condiciones de frontera, identificando el renglón y la columna de la malla; los valores para cada celda son designados dependiendo de la topografía.

Cuadro 4.1 Datos de entrada para la condiciones de frontera de carga constante.

Flanco	Inicia		Final		Carga (m)		Tiempo (día)
	R	C	R	C	inic.	Final	
Norte	7	15	10	39	2430	2430	12045
Oeste	11	2	52	23	2600	2100	12045
Este	11	53	40	54	2385	2250	12045

Cuadro 4.2 Datos de entrada para la condiciones de frontera río.

Río	Inicia		Final		Elevación (m)	Elevación Base (m)	Conductancia m ² /día	T (día)
	R	C	R	C				
Atoyac	8	6	56	38	2559	2556	550	12045
			56	38	2056	2053	550	"
Zahuapan	8	42	32	40	2405	2401	500	12045
			32	40	2130	2135	500	"

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

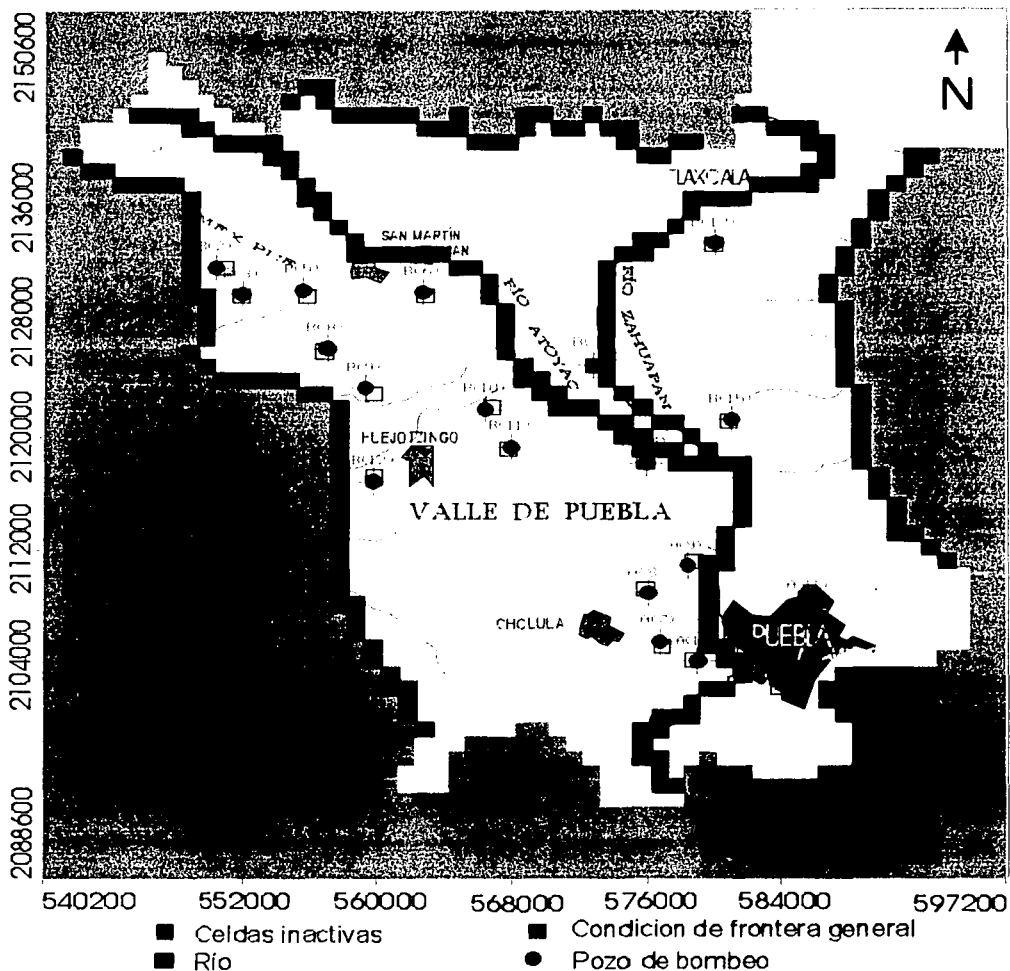


Figura 4.7 Condiciones de frontera y Pozos de bombeo emplazados.

4.6 Calibración

El proceso de calibración se efectuó partiendo de una simulación en estado estacionario antes del año 1973, bajo tal situación, se recurrió a la historia piezométrica, (figuras 1.4, 1.5, y 1.6) con el fin de abordar la primera aproximación del modelo basado en un escenario congruente que representara al acuífero.

Posteriormente se realizó una corrida del modelo para simular un estado transitorio incorporando los parámetros que coincidieran con los valores del cuadro 2.7, que son los que corresponden al año 1997. Para este ajuste también se posicionaron pozos de observación (figura 4.10) que permiten calibrar el modelo, así finalmente se modificó el tiempo de cálculo en el simulador bajo régimen transitorio para obtener el comportamiento de las curvas equipotenciales del nivel de agua en el acuífero hasta el año 2007.

4.7 Escenarios

El primer escenario es una corrida del modelo en estado estacionario: los pozos emplazados son desactivamos para que no exista extracción, y realizamos la simulación para un tiempo de 12045 días con 10 períodos de esfuerzo, la figura 4.9 nos muestra la configuración de las líneas equipotenciales del nivel freático.

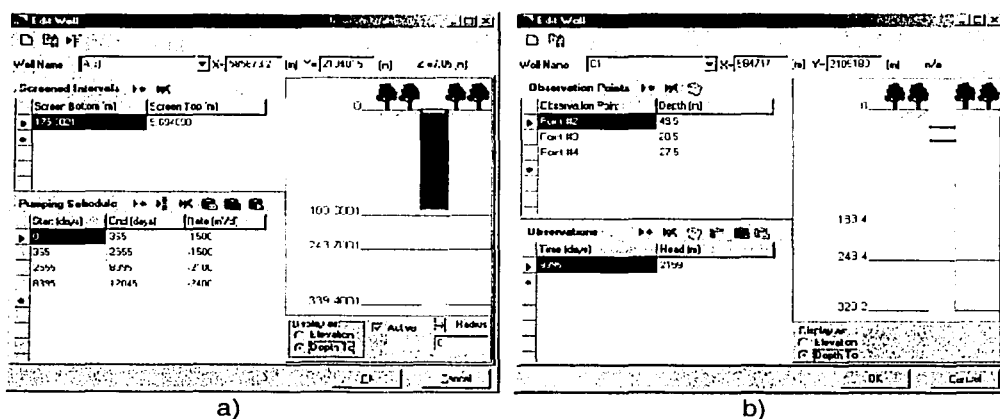


Figura 4.8 Incorporación al modelo de pozos; a) Pozo de bombeo, b) Pozo de observación.

El segundo escenario es una aproximación en estado transitorio para 2555 días que corresponde al año de 1984 desde el inicio de la simulación (1973), y es la siguiente referencia en cuanto al nivel de la zona saturada en el acuífero, además activamos los pozos de extracción de agua para que participen en el cálculo. La configuración para este escenario se muestra en la figura 4.10 y en la figura 4.12 se presenta la correlación entre el resultado del modelo y los niveles medidos en los pozos de observación.

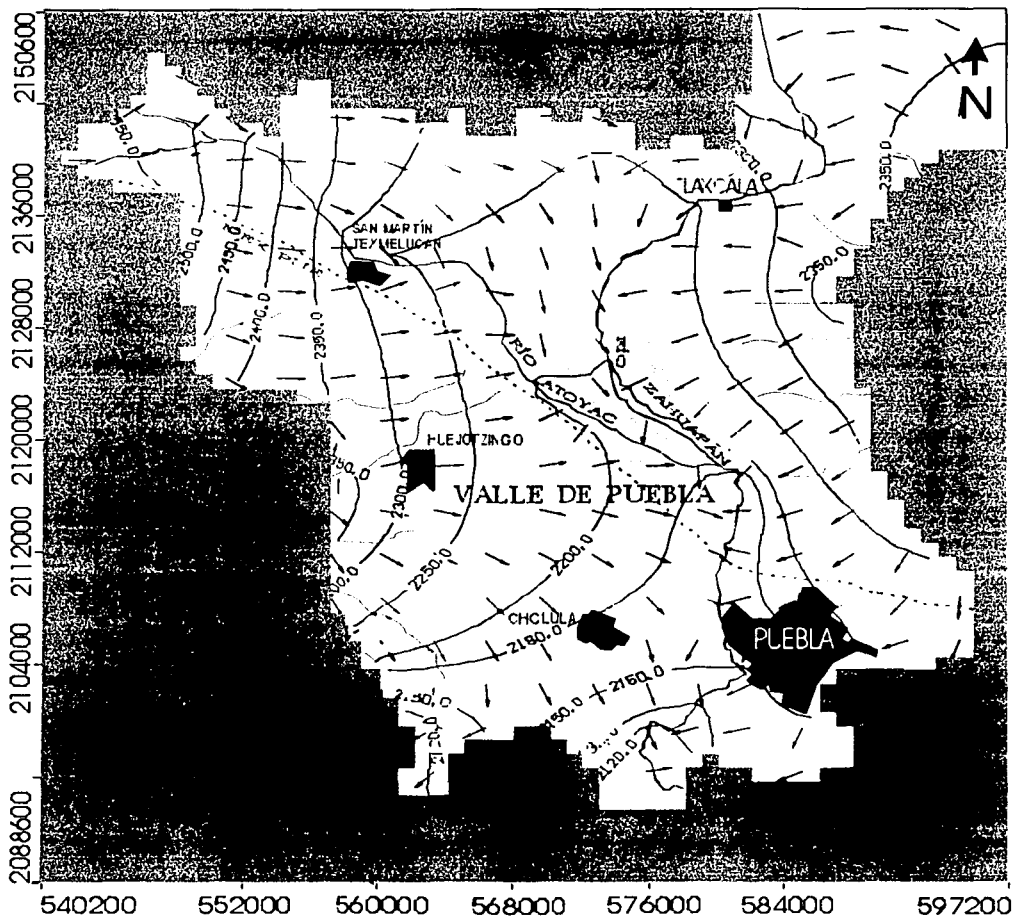


Figura 4.9 Configuración del modelo para estado estacionario.

El tercer escenario está definido por una corrida en estado transitorio para un tiempo de 8760 días (24 años) de 1973 a 1997, considerando todos los parámetros anteriores y los pozos de bombeo como estando activos, nuevamente fueron requeridos los datos de la historia piezométrica y también el cuadro 2.7 para su ajuste.

Con el fin de optimizar la simulación se realizó una malla más fina sólo en el centro del Valle de Puebla (mayor número de renglones y columnas), modificando la dimensión de las celdas originales a 250 m².

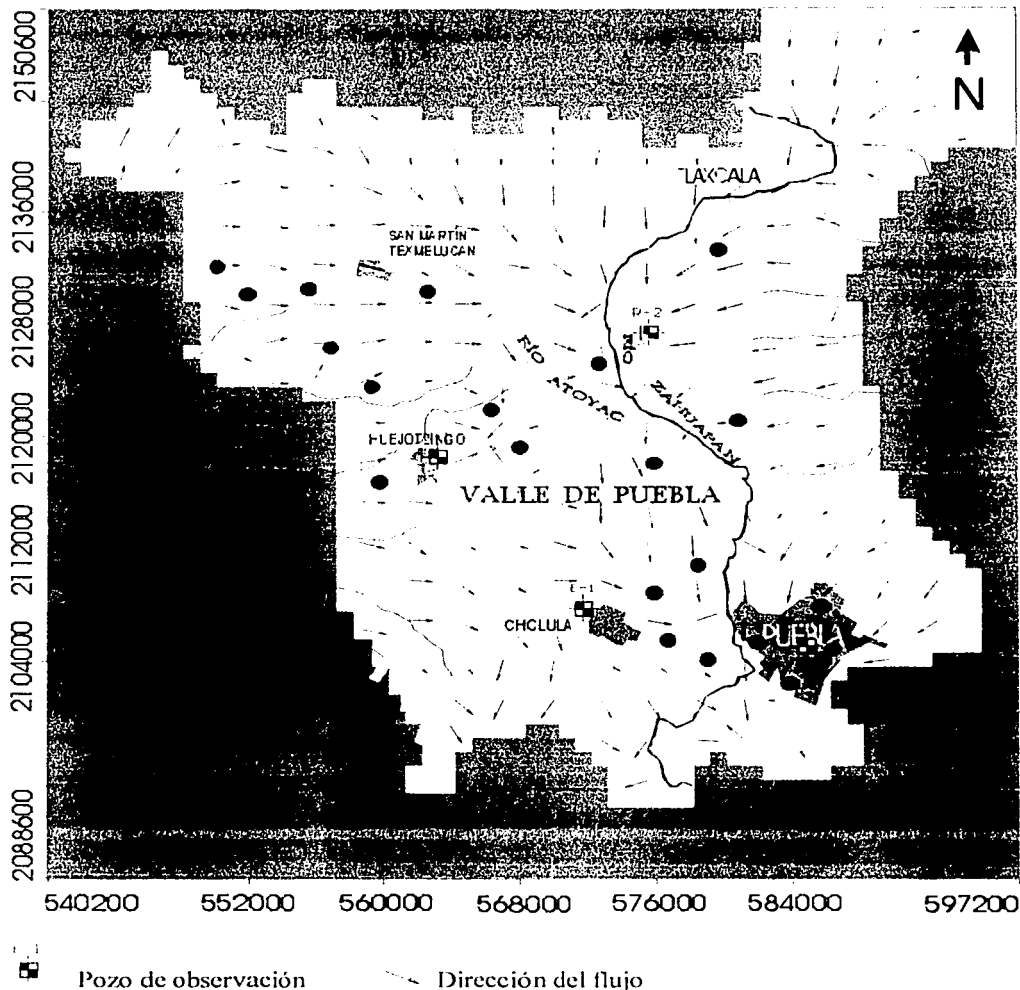


Figura 4.10 Configuración del modelo para estado transitorio (2555 días) año 1980.

Se modificó a partir de las coordenadas (559200, 2099600) y (587200, 2137600) con el propósito de hacer participar un mayor número de nodos en la aproximación numérica, obteniéndose una malla de 176 renglones por 143 columnas. La figura 4.10 muestra la configuración de éste escenario y la figura 4.12 la correlación entre los niveles medidos en los pozos de observación y los resultados del modelo.

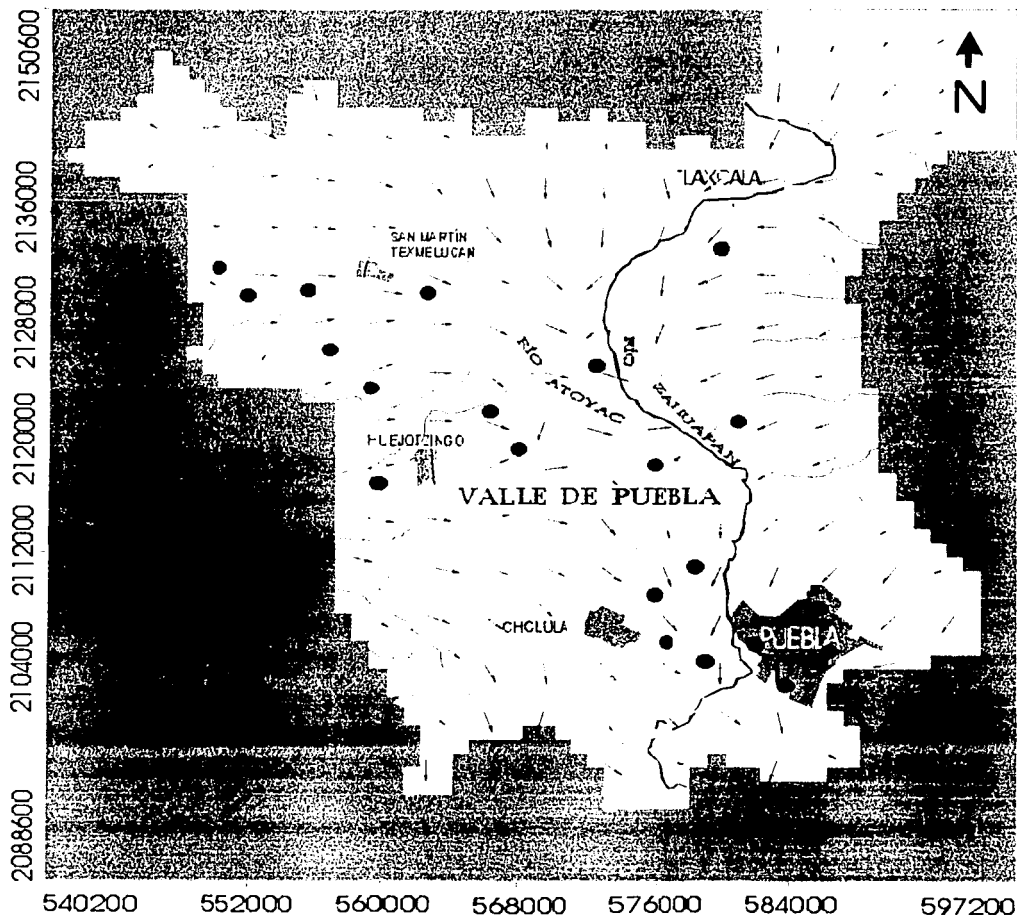
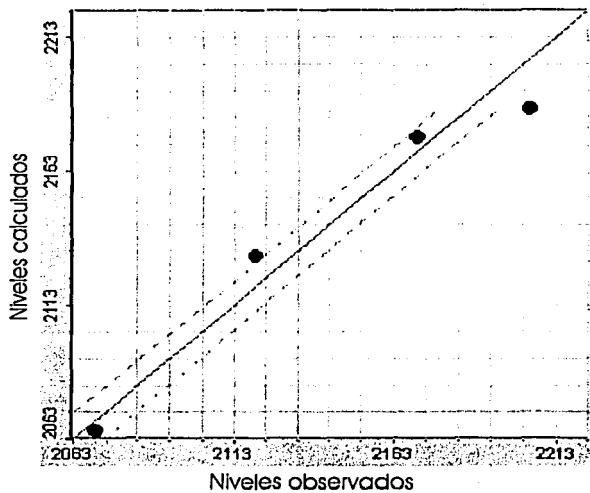


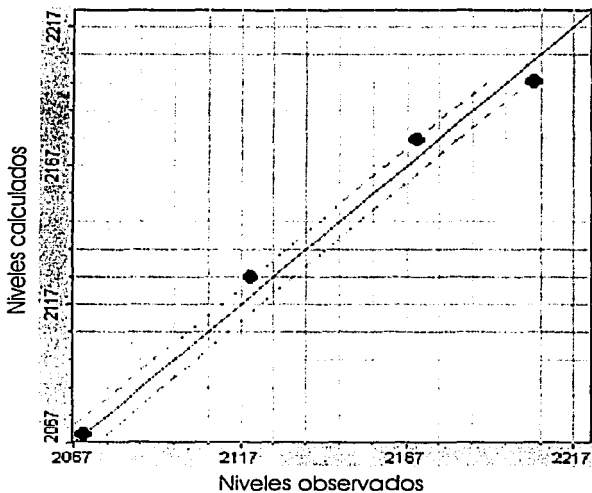
Figura 4.11 Configuración del modelo para estado transitorio (8760 días) año 1997.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Número de puntos: 13
 Error medio: -3.4809 (m)
 Error Absoluto Medio: 11.8220 (m)
 Error Estandar de la Estimación: 4.425 (m)
 Desv. Estandar de la Estimación: 15.72 (m)
 Desv. Estandar Normalizada: 10.4805 (m)

Figura 4.12 Correlación entre niveles calculados y observados para los pozos de calibración para el año 1980.



Número de puntos: 13
 Error medio: -0.59908 (m)
 Error Absoluto Medio: 7.61823 (m)
 Error Estandar de la Estimación: 2.976 (m)
 Desv. Est. de la Estimación: 10.3296 (m)
 Desv. Estandar Normalizada: 6.8864 (m)

Figura 4.13 Correlación entre niveles calculados y observados para los pozos de calibración para el año 1997.

El cuarto y último escenario es el más importante ya que exhibe la esencia del trabajo realizado, la estimación (predicción) numérica del sistema acuifero para el año 2007 (12045 días) en un estado transitorio, y asignando a los pozos de bombeo una extracción mayor a la que se calculó en el año 1997; de acuerdo al requerimiento que se ha manifestado especialmente para cubrir las actividades antropogénicas. La figura 4.14 representa dicha configuración.

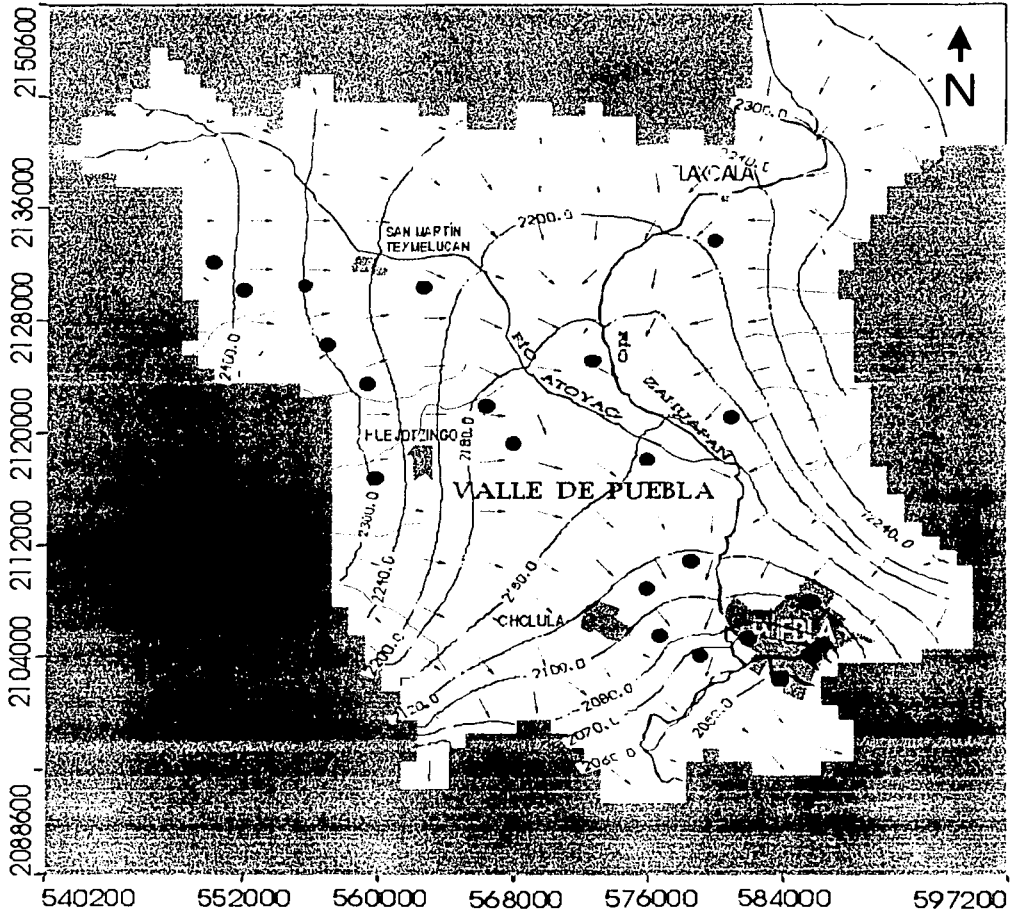


Figura 4.14 Configuración de la elevación del nivel estático para el año 2007.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Incluimos para mejor visualización la configuración en sección del renglón 143 y la columna 137 en las figuras 4.13a y b, en donde observamos el cono de abatimiento que se ha generado en la ciudad de Puebla y a sus alrededores a causa de la sobre-explotación, además se evidencia un mayor declive del nivel freático, que coincide con las medidas para el pozo de observación del año 1996.

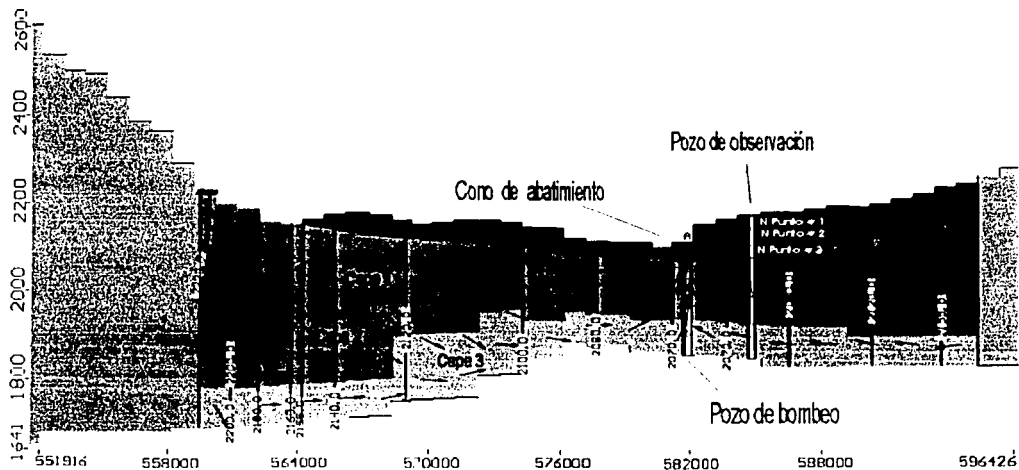


Figura 4.14a sección del renglón 143.

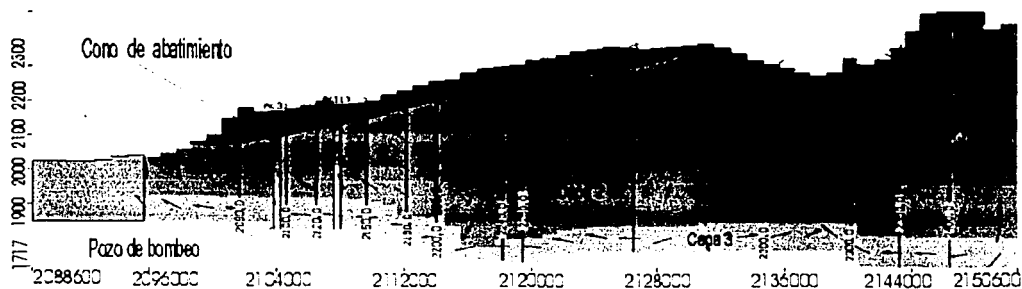


Figura 4.14b sección de la columna 137.

4.8 Resultados

Para condiciones estimadas al año 2007, el balance de agua subterránea del modelo numérico en el acuífero "Valle de Puebla" arrojó un volumen de recarga de 365 millones de metros cúbicos, de los cuales 112 se pierden por evapotranspiración. Y una pérdida en el almacenamiento de -91.5 Mm^3 , que corresponde a la disponibilidad del agua subterránea.

Cuadro 4.5 Balance de aguas subterráneas para el año 2007 (Mm^3).

	Entradas	Salidas
Carga constante	9000	128.3
Pozos	0	393.4
Drenes	0	0
Recarga	365.5	0
Evapotranspiración	0	112.2
Río	330.6	4045

Al efectuar el análisis del acuífero bajo un régimen transitorio hasta el año 2007, se obtuvo la configuración que se observa en la Figura 4.10. Las predicciones numéricas estimadas en el modelo son congruentes con los informes de estudios realizados anteriormente; el mayor abatimiento del nivel de la zona saturada del acuífero disminuye al sur y oeste de la ciudad de Puebla coincidiendo con la figura 1.8.

En el área de influencia de esta localidad, se encuentran un mayor número de captaciones (ver apéndice 1) cuyo volumen de extracción es resentido por el acuífero. En el desarrollo del régimen transitorio se apreció que la recarga no era capaz de sustituir al agua extraída por lo que el acuífero sufrirá abatimientos importantes dentro de cuatro años. En esta región se tendrían abatimientos del orden de 20 m cada 3 años y como resultad niveles estáticos con profundidad de 60, 80, y 100 metros.

En el resto del acuífero el nivel de la zona saturada aún se considera inalterado debido a que el comportamiento de los niveles es casi el mismo que el del año de 1973, que se considera el inicio del monitoreo del acuífero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

El cálculo del balance de masa del sistema acuífero, de acuerdo al modelo, nos predice que del año 1973 al año de 2007 el cono de abatimiento del nivel estático declinará de 90 a 100 metros, en la zona sur de la cuenca, y particularmente de la ciudad de Puebla y sus alrededores, que es donde se presenta una mayor demanda de agua. Este efecto simulado coincide con el registro medido que se tiene para el año 1996 (abatimiento de 80 metros). Lo anterior es consecuencia del desequilibrio del sistema ya que el volumen disponible de agua subterránea depende de la recarga del acuífero, y del manejo de sus descarga natural y artificial para no producir efectos perjudiciales.

La cantidad de agua que puede extraerse en forma continua de un acuífero, a largo plazo se denomina 'Rendimiento Seguro' y la magnitud para este caso, es menor que la recarga media anual, hecho evidente para el año 1996 y que se confirma con la simulación numérica estimada al año 2007, que es la meta en el presente trabajo.

El modelo regional del acuífero del Valle de Puebla nos ha permitido aumentar los conocimientos del acuífero de forma sistemática y adecuada, tal como predecir los cambios en el espesor saturado. El modelado puede tener aplicación en otras áreas. Actualmente los acuíferos presentan graves problemas de contaminación éste no es la excepción, el modelo numérico además cuenta con la posibilidad de configurar la pluma de contaminación, que en este trabajo no se efectuó debido a que se carece de información acerca de las fuentes.

Los modelos computacionales como el realizado en este trabajo son una poderosa herramienta, pues permiten acrecentar y aprovechar mejor el agua subterránea, diseñar y operar en condiciones óptimas el sistema natural acuífero, prever su comportamiento, planear su evolución futura y administrar el sistema ya que es de interés fundamental público ó privado. Más aún este modelo es un elemento más de ayuda para: la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, estudios de vulnerabilidad del agua subterránea, disponibilidad del agua subterránea y para la gestión del agua subterránea.

Una propuesta para atenuar el problema en este acuífero es ubicar los puntos donde se presenta la recarga natural y explotarlos de manera óptima por medio de un proyecto de acueductos para trasportar el agua superficial y subterránea hacía las poblaciones donde más demanda existe. Así también establecer un rango máximo de extracción en los lugares más afectados del acuífero.

Se recomienda que en el año 2007 se realice un estudio del acuífero, que comprenda la implementación de hidrógrafos para verificar la configuración y cálculos predichos por el modelo. Y que de corroborarse hacer una estimación para el año 2017 u otro año, si este no es el caso realizar las modificaciones concernientes en cuanto a los parámetros y posteriormente efectuar una nueva estimación.

BIBLIOGRAFÍA

Bachmat, Y., 1967. On the similitude of dispersion phenomena in homogeneous and isotropic porous media. *Water Resour. Res.*, Vol. 3, No 4, pp 1079-1083.

Ber., 1961. On the tensor form of dispersion in porous media. *J. Geophys Res.* 66 VOL. No. 4, pp 1185-1197

Celia M. A., Russell T. F., Herrera I. And Erwing R. E., 1990 An Eulerian-Lagrange localized adjoint method for the advection-diffusion equation *Adv. Water Resources*, Vol. 13, No. 4 pp 187-206.

El-Kadi, A.I., 1988. Applying the USGS mass-transport model (MOC) to remedial actions by recovery wells. *Ground Water* V.26, No.3, pp 281-288

Ferrari, L., Garduño, V. H., Pasqueré, G. and Tibaldi, A. 1994. Volcanic and Tectonic evolution of Central México: Oligocene to Present. *Geofísica Internacional*, vol. 33, 91-105 pp.

Fetter, C.W., 1994, *Applied Hydrogeology*, 3^a ed., Prentice Hall, United States of America.

Freeze, R.A., 1975. A stochastic conceptual analysis of one-dimensional ground-water flow in non-uniform homogeneous media. *Water Resour. Res.*, Vol. 11, No. 5, pp 725-741

Gardner, Jr. A.O., Peaceman, D.W. and Pozzi, Jr. A.L., 1964 Numerical Calculation of multidimensional miscible displacement by the method of characteristics. *Soc. Pet.Eng.J.* V.6, No.2, pp. 175 -182.

Geotecnología S.A., 1997. Actualización del Estudio Geohidrológico de los acuíferos del Valle de Puebla, Pue. Elaborado para el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Puebla (SOAPAP).

Harleman, D.R.E., and Rumer, R.R., 1962. The Dynamics of Salt-Water Intrusion in Porous Media. Rep.No. 55, Hydrodynamic Lab., MIT, Cambridge, MA

Istok Jonathan, *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*. American Geophysical Union. *Water Resources Monograph* 13.

Luckey, R.R., Gutentag, E.D., Heimes, F.J., Weeks, J.B., 1986, Digital simulation of ground-water flow in the High Plains aquifer in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming: U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1400-D, 57 p.

Kazman, R.G., 1972 *Modern Hydrology*, 2^a ed., Haper & Row, United States of America.

Konikow, L.F., and Bredehoeft, J.D., 1978. Computer Model of Two-Dimensional Solute Transport and Dispersion in Ground Water. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Book 7, Chapter C2, 90 pp.

Mc. Donald, M.G. y Harbaug, A. W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey. Libro 6, capítulo A1.

Monografía Geológico-Minera Del Estado De Puebla. Consejo de Recursos Minerales 1995 Secretaría de comercio y fomento industrial coordinación general de Minería, SECOFI.

Mooser F., Montiel A., Zuñiga A. Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla, CFE. 1996.

Orellana Ernesto. Prospección Geoeléctrica. En corriente Continua. Biblioteca Técnica Philips. Madrid, España, 1972.

Schwartz, F.W., 1977. Macroscopic dispersion in porous media: the controlling factors Water Resour. Res., Vol. 13, No. 4, pp 743-752.

Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla, Gerencia de Aguas Subterráneas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SAHR) 1992.

Vázquez Sánchez y R. Jaimes-Palomera: Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, pp 133-190, Vol. 28 Núm. 2, México D.F. 1989.

Voss, C.I., 1984. SUTRA: A Finite Element Simulation Model for Saturated-Unsaturated, Fluid-Density-Dependent Ground Water Flow with Energy Transport or Chemical Reactive Single-Species Solute Transport. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369

Waterloo Hydrogeologic, Inc. (1999). User's manual for Visual MODFLOW: 3-D Groundwater Flow and Transport Modeling. Waterloo, Ontario, Canada.

Zheng, C., 1990. MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, 170 pp.

Zheng, C., 1992. MT3D version 1.8 Documentation and User's Guide. S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., Bethesda, MD.

Zheng C., 1993, Extensión of the method of characteristics for simulation of solute transport in three dimensions, Ground Water, V.31, p 456-465

BIBLIOGRAFÍA NO CITADA

Charbeneau, R.J., Street, R.L., 1978, Finite element modeling of ground-water injection-abstraction systems: Stanford University, Department of Civil Engineering, Technical Report , 231, 118 p.

Demant, A., Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Revista del Instituto de Geología, UNAM, V.2 No. p.p. 172-187, 1978.

Díaz, N. J. J. 2000. Simulación numérica del flujo subterráneo en el acuífero del Soconusco, Chiapas. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica. p. 70.

Dutton A. R. y Mace R.E. 2002, Evolución de los modelos numéricos de flujo de agua subterránea en el acuífero de Ogallala en Texas, Rev. Méx. de Ciencias Geol., v. 19-2,107-119.

Fogg, G.E., Noyes, C.D., Carle, S.F., 1998, Geologically based model of heterogeneous hydraulic conductivity in an alluvial setting: Hydrogeology Journal, 6 (1), 131-143.

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

García J.L. , Heredia J.,Murillo J.M. ,Rubio J.C., González A. y López J.A. ,2000 Contribución desde la modelización del flujo subterráneo al conocimiento del acuífero del Río Verde (Granada)

Harbaugh, A.W., McDonald, M.G., 1996, User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey, Open-File Report, 96-485, 220 p.

Jiménez Suárez Gabriel. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Puebla. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), UNAM, 1997.

Mooser F., y Seele, Tectónica del Valle de Puebla, Geofísica Internacional, Vol. 12, No. 1972.

Morales Cacique Eric. Análisis Numérico de Flujo Regional de Agua Subterránea: Cuenca del Río Amacuzac. Tesis de Maestría. Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades Posgrado en Geofísica, UNAM, 1997.

Pinder, G. F. and J. D. Bredehoeft. "Application of the Digital Computer for Aquifer Evaluation." Water Resources ... Ponce, V. M., Y. H. Chen and D. B. Simons. ... kahuna.sdsu.edu/~ojos/webpublish/bib.htm

APÉNDICE I

Los datos de entrada de calidad, como por ejemplo la conductividad hidráulica, la recarga y el la extracción, son importantes para mejorar el comportamiento del modelo.

Las estimaciones de la conductividad hidráulica a una escala más fina, pueden ser mejores si se relacionan las mediciones existentes con las variaciones geológicas dentro del acuífero. Se puede también mejorar significativamente la cantidad de datos, si en pozos nuevos se comienza a exigir pruebas de bombeo (reducción de nivel contra tiempo) o pruebas de capacidad específica.

1. Censo de aprovechamientos del agua subterránea.

En 1973 se censaron 949 captaciones de agua subterránea, de los cuales 234 eran pozos profundos, 679 norias, 32 manantiales y 4 galerías filtrantes, con un volumen de extracción de $128.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, el área de estudio comprendía los estados de Puebla y Tlaxcala.

En 1981 se censaron 1030 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 646 son pozos profundos, 14 manantiales y 370 norias. En este estudio sólo se tomaron los aprovechamientos que contaban con equipo de bombeo y con una descarga mayor o igual a 4", estimándose en 300 y 500 los aprovechamientos que tienen diámetros de descarga menores. El volumen de extracción estimado resultó de $214.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

El estudio de 1990 reporta la existencia de 26358 aprovechamientos de agua subterránea y 9 de agua superficial sobre los ríos del Valle de Puebla; de los subterráneos, 25,141 corresponden a norias, 1189 son pozos, 17 manantiales y 2 galerías. De los 1189 pozos se clasificaron 246 aprovechamientos destinados al uso potable, 230 al agrícola, 705 industriales y 8 ganaderos, aunque en aquel entonces sólo se visitaron en campo 279 obras, 69 norias, 201 pozos y 9 manantiales. Se estimó que todos estos aprovechamientos extraían en conjunto $303.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

De esta manera se censaron en total 894 aprovechamientos, de los cuales 5 son manantiales, 158 norias y 731 pozos; de estas dos últimas clasificaciones, 63 están inactivos según se puede ver en la Tabla No. 2.

2. Hidrometría de los volúmenes de extracción.

Con las cifras del censo anterior y con base en los aforos realizados en campo y los tiempos de operación proporcionados por los usuarios, se estimaron los volúmenes anuales de extracción. Cuando no fue posible obtener tiempo de operación o aforar, por ausencia, negativa o desconocimiento del dato por parte de la persona o usuario que atendió nuestra petición, se utilizaron cifras promedio para cada uso y tipo de aprovechamiento. En algunos casos se verificaron o se cuantificaron con los consumos de energía eléctrica, resultados se reportan en la tabla No. 3, donde se llega a un volumen anual de 315.9 millones de metros cúbicos como extracción de todos los usuarios del recurso.

3. Hidrógrafos regionales.

Se lograron formar los hidrógrafos de 15 pozos localizados en el valle de Puebla, cuyas gráficas se reportan en el la tabla No. 7, con el propósito principal de modelar el sistema de acuíferos, además de mostrar el comportamiento piezométrico del acuífero.

Se nota en todos los pozos la tendencia a los abatimientos más o menos marcada, excepto en los F5-45, CEDA, y D3-10, Santa Inés, manteniéndose prácticamente igual entre 1990-1996, para el primero, que se localiza en la porción norte del área configurada, y con una clara recuperación piezométrica en el segundo pozo para el mismo período, que por cierto se localiza junto al río Atoyac y por lo mismo, es más sensible a la recarga.

Al sur del área, los pozos de la batería Atlíxcayotl muestran abatimientos muy fuertes desde su construcción a la fecha, con la excepción del pozo Atlíxcayotl No. 7, donde se nota una pequeña recuperación debida seguramente a que han dejado de operar en forma continua los nueve pozos, en atención a la degradación del agua alumbrada.

4. Características hidrodinámicas de los acuíferos.

En el estudio de 1990, se reportan 26 pruebas de bombeo, 7 localizadas en la ciudad de Puebla y las restantes distribuidas en el valle de igual nombre. Excepto dos pruebas, las demás se hicieron sin pozo de observación. En la tabla No. 10 se reportan los resultados, de cuya localización en 9 se pudo identificar.

De su interpretación y determinación de las transmisividades se aprecia que éstas varían entre 0.64 y $27.88 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ si se considera el criterio de Theis, y de 0.09 a $163 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ de acuerdo con el criterio de Hantush; sin embargo, se advierte una disparidad fuerte al comparar los valores derivados de ambos criterios para los pozos E-6 Carretas, G2-18, F4-45 y C3-13.

No existen antecedentes acerca de la granulometría de los acuíferos del Valle de Puebla, a no ser un informe sobre la perforación del pozo Concepción La Cruz No. 1, destinado originalmente a formar parte de la batería de pozos del sistema Atlíxcayotl. Se trata del análisis de muestras ubicadas alrededor de los 70 metros de profundidad, que casualmente representan arenas finas y medias de la formación atravesada

5. Escurrimiento

Si se considera una precipitación media anual en el valle de unos 880 mm, y el área de la cuenca en $3,465.5 \text{ Km}^2$ hasta la estación Echeverría, el volumen llovido resulta de 3050 millones de metros cúbicos al año, y los coeficientes de escurrimiento total, indirecto y base para toda la cuenca analizada resultan de 0.132 (404/3050), 0.085 (260/3050) y 0.047 (144/3050), respectivamente (tabla No. I).

Tabla No. 1 Ecurrimientos medios mensuales en la estación Echeverría
Volúmenes en Mm³

MES	Escurrimiento total	Escurrimiento indirecto	Escurrimiento base
E	14		12
F	11		12
M	10		12
A	12		12
M	24		12
J	49		12
J	61		12
A	73		12
S	66		12
O	43		12
N	23		12
D	17		12
PROMEDIO	34	22	12
Volumen anual	404	260	144
Volumen llovido	3050	3050	3050
Coefficientes de escurrimiento	0.132	0.085	0.047

Tabla No. 2 Elevaciones de brocales de pozos

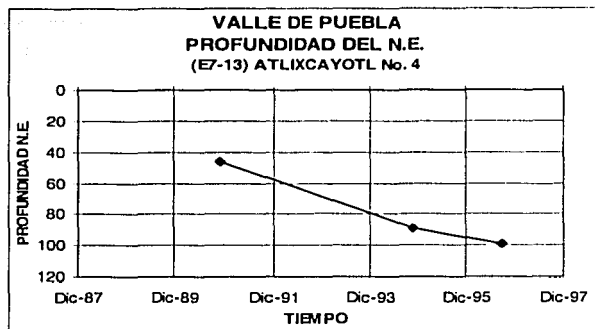
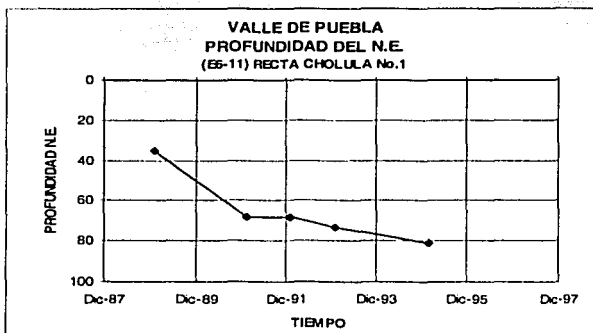
No. pozo según censo	Localidad	Elevación (msnm)
BN Maestro DETENAL		2,231.750
G6-1	Maravillas 1	2,218.546
G6-7	Parque 2000	2,226.893
Gc-20	San Antonio Abad	2,214.147
G6-22	Manuel Rivera Anaya No. 2	2,209.509
G6-23	Manuel Rivera Anaya No. 3	2,211.081
G6-25	Amalucan No. 2	2,199.209
G6-35	Gonzalo Bautista	2,186.459
G6-28	San Rafael 1	2,186.237
G6-29	San Rafael 3	2,190.521
F6-14	Rementería	2,172.835
F6-13	Santa Rosa	2,173.506
F6-16	Xonaca 1	2,157.829
F6-18	Cristo	2,151.115
F6-21	Ecológico 1	2,149.455
F6-20	Ecológico 2	2,145.676
F6-27	Héroes de Puebla	2,130.122
F6-37	Paraiso	2,128.918
F6-39	Margarita 1	2,123.986
F6-40	Margarita 2	2,128.937
F7-82	CU 2	2,129.602
F7-88	San Baltazar 1	2,123.972
F7-89	San Baltazar 2	2,122.026
F7-72	San Baltazar 4	2,127.486
F7-80	San Jorge	2,113.327
F7-87	Loma Bella 2	2,112.981
F7-74	San Bartolo 1	2,111.522
F7-84	San Bartolo 2	2,109.884
E7-5	Castillota	2,109.020
E7-2	Unidad La Carmelita	2,106.772
E7-15	Atlixcayotl 2	2,108.803
F6-28	Cri-cri	2,140.741
F6-30	El Mirador 2	2,135.420
F6-31	ISSSTEPEP	2,128.773

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla No. 7 Hidrógrafos regionales

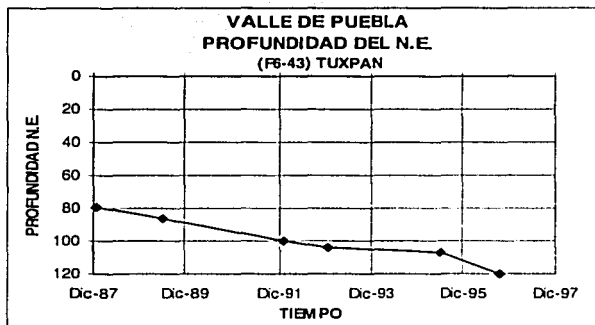
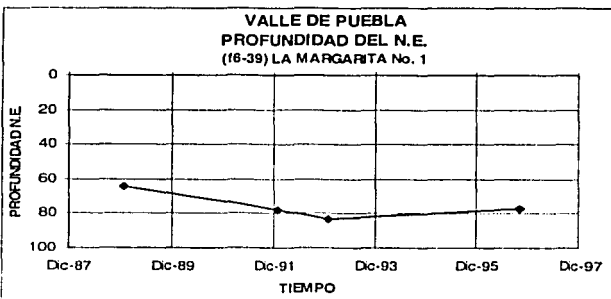
E6-11	Recta Cholula No. 1	35.05	05-Ene-89
E6-11	Recta Cholula No. 1	68.00	10-Ene-91
E6-11	Recta Cholula No. 1	68.00	10-Ene-92
E6-11	Recta Cholula No. 1	73.00	06-Ene-93
E6-11	Recta Cholula No. 1	81.07	13-Feb-95

E7-13	Atlixcayotl No. 4	46.00	12-Nov-90
E7-13	Atlixcayotl No. 4	89.34	01-Nov-94
E7-13	Atlixcayotl No. 4	99.41	16-Sep-96



F6-39	La Margarita No. 1	83.00	16-Jun-83
F6-39	La Margarita No. 1	64.00	04-Ene-89
F6-39	La Margarita No. 1	77.60	02-Ene-92
F6-39	La Margarita No. 1	83.00	06-Ene-93
F6-39	La Margarita No. 1	77.00	26-Sep-96

F6-43	Tuxpan	79.55	01-Ene-88
F6-43	Tuxpan	86.25	11-Jun-89
F6-43	Tuxpan	99.80	10-Ene-92
F6-43	Tuxpan	103.50	06-Ene-93
F6-43	Tuxpan	107.00	16-Jun-95
F6-43	Tuxpan	120.00	26-Sep-96



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA No.8

PRUEBAS DE BOMBEO, VALLE DE
PUEBLA
REALIZADAS DURANTE
1997

No. Pozo	Ubicación	Profundidad m	Caudal l/s	Tiempo de Duración minutos	N.E.	N.D.	Q.E.	TRANSMISIVIDAD		THEIS	HANTUSH	k m/día	Qe	T
					m	m	lps/m	Theis 10 ⁻³ m ² /s	Hantush 10 ⁻³ m ² /s	T m ² /día	T m ² /día			
1	E7-9 Atlixcayotl No. 9	215	30.5	1920	82.20	107.40	1.21	1.34	0.19	113.6	16.3	0.076	1.21	16.3
2	F5-37 Barranca Honda No. 3	98	31.5	1920	10.13	31.51	1.47	2.34	0.88	198.0	74.6	0.761	1.47	74.6
3	E6-6 Carretas	200	32.0	360	60.12	63.00	11.11	15.14	163.78	1281.0	13856.0	69.280	11.11	13856.0
4	F6-13 Santa Rosa	130	13.0	960	83.66	105.61	0.59	0.64	0.16	54.1	13.4	0.103	0.59	13.4
5	F7-88 San Ballazar No. 1	98	17.0	1470	99.60	100.81	14.05	12.28	11.13	1039.2	941.4	9.606	14.05	941.4
6	C3-2 La Tranquilidad No. 4	120	33.0	1920	45.48	50.12	7.11	12.66	7.28	1070.7	616.1	5.134	7.11	616.1
7	F3-21 San Pedro Muñoztla No. 2		16.5	1920	75.50	76.56	15.57	27.88	0.09	2358.8	7.3		15.57	7.3
8	G2-18 Barrio del Alto No.2		46.8	1920	37.68	44.77	6.61	12.82	0.39	1084.7	33.2		6.61	33.2
9	D5-4 Tomalintla No. 3		18.2	1920	23.05	35.52	1.46	1.47	0.56	124.1	47.4		1.46	47.4
10	E3-16 San Andrés Cuamilpa San Antonio Papalotla		8.6	1920	58.29	61.67	2.53	2.43	1.94	205.6	164.4		2.53	164.4
11	F4-45 No.1		8.6	1920	28.34	37.25	0.96	1.94	17.34	164.4	1466.8		0.96	1466.8
12	F4-46 San Toribio		60.0	480	12.02	27.38	3.91	5.14	3.15	434.6	266.9		7.07	85.3
13	C3-13 San Martín Texmelucan		65.7	1440	12.04	21.33	7.07	20.17	1.01	1706.2	85.3	1.631	5.16	244.7
14	C7-16 Ignacio Zaragoza 5 Santa Clara Atoyatenco	150	66.6	2880	46.72	59.62	5.16	4.30	2.89	363.8	244.7		5.45	524.3
15	E4-28 No. 3		65.0	1440	3.03	14.95	5.45	10.64	6.20	899.9	524.3	0.565	5.55	56.5
16	E6-35 SOAPACH 2	100	40.5	600	23.21	30.51	5.55	13.35	0.67	1129.1	56.5	17.380	7.51	1738.0
17	F5-29 Papalotla Almecatla	100	50.0	1920	33.10	39.76	7.51	11.87	20.54	1004.1	1738.0		5.30	531.8
18	F5-26 San Lorenzo Amecatla		14.1	1920	35.54	38.2	5.30	7.30	6.29	617.3	531.8		1.45	80.9
19	E4-1 HYLSA		50.0	1680	1.66	36.12	1.45	1.66	0.96	140.7	80.9			

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla No. 6

No. Pozo	Ubicación	Profundidad M	Caudal l/s	N.E.	N.D.	Q.E.	Qe
				m	m	lps/m	
CAPACIDAD ESPECIFICA							
G6-24	Amalucan	190	15.2	84.12	146.00	0.25	97.53
F5-12	Moratilla No. 4	97.53	51.2	42.97	82.00	1.31	157.00
F7-90	Xilotzingo	157	55.0	90.52	93.5	18.46	175.00
G6-8	Xonacatepec No. 4	175	50.0	91.44	106.00	3.43	150.00
F6-5	Autopista	150	14.9	48.76	114.00	0.23	206.00
F5-35	Barranca Honda No. 1	206	45.4	86.00	92.96	6.52	123.00
F6-34	Plaza América	123	9.2	67.97	115.00	0.20	162.50
G6-10	Atlixcayotl No. 5	162.5	9.9	91.13	122.00	0.32	159.70
G6-10	Xonacatepec No. 2	159.7	21.5	102.41	130.00	0.78	128.00
F5-44	Cedas No. 4	128	44.2	71.62	92.00	2.17	100.00
F5-38	Barranca Honda No. 4	100	49.1	39.01	58.00	2.58	141.00
	Recta Cholula No. 6	141	66.6	82.29	96.00	4.86	113.00
	Fovissste San Roque	113	7.5	89.91	105.50	0.48	140.00
F5-45	Ceda No. 5	140	6.2	48.76	124.00	0.08	150.00
F5-41	Ceda No. 1	150	39.2	53.34	116.00	0.62	117.00
	Coatepec	117	9.0	101.19	115.00	0.65	128.00
E6-11	Recta Cholula No. 1	128	20.0	81.07	118.00	0.54	90.00
F5-14	Tulcingo	90	24.7	38.70	69.00	0.81	151.00
F6-24	Parque Juárez	151	25.2	53.64	138.00	0.30	144.00
F6-42	San Miguel	144	40.8	119.17	121.00	22.30	99.06
	San Baltazar No. 1	99.06	25.7	92.35	95.50	8.16	139.00
F5-36	Barranca Honda No. 2	139	49.3	13.71	72.00	0.85	200.00
G6-1	Malintzi No. 2	200	20.1	85.95	103.73	1.13	123.00
F6-12	México 68	123	48.7	81.99	103.00	2.32	197.00
	Emiliano Zapata No. 1	197	20.1	71.62	131.00	0.34	175.00
	Emiliano Zapata No. 4	175	8.8	100.58	147.00	0.19	200.00
D6-7	Nealtican No. 1	200	9.5	45.57	152.56	0.09	200.00
D6-6	Nealtican No. 2	200	35.0	47.69	144.46	0.36	150.00

**TESIS CON
FALTA DE ORIGEN**