

01162



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**MODELO DE ELEMENTO FINITO PARA EL
FLUJO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE
QUERÉTARO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA**

P R E S E N T A:

ROEL SIMUTA CHAMPO

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. GRACIELA HERRERA ZAMARRÓN



CAMPUS MORELOS, MEXICO

2005

m340045



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

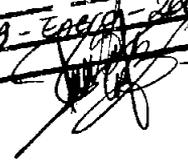
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

Autorizada a la Oficina de Asesoría de la
UNACI a manejar el trámite electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo respectivo.

NOMBRE: Rael Simón Chambo

FECHA: 19 - Enero - 2005

FIRMA: 

DEDICATORIA

A DIOS: *Tu ciencia es un misterio para mí, tan grande que no puedo comprenderla.
Salmo 139.*

A MIS PADRES: *Santana Simuta Montejo y Elvia Champo Bautista.
Por el esfuerzo, cariño y ejemplo que le han dado a mi vida.*

A MIS TÍOS: *Germán Champo Bautista y
Feliciano Champo Bautista.
Por el apoyo que le han dado a mi vida personal y
profesional.*

A MI NOVIA: *Elisama Carrasco Reyes.
Por su cariño incondicional.*

AGRADECIMIENTO

A mi directora de tesis: Dra. Graciela Herrera Zamarrón.

Por sus comentarios, paciencia y tiempo dedicado durante el desarrollo de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

A mi comité tutorial:

Dr. Carlos Cruickshank Villanueva

M.C. Carlos Gutiérrez Ojeda

M.C. Manuel Martínez Morales

Dr. Carlos Fuentes Ruiz

Por los comentarios hechos al presente trabajo.

Í N D I C E

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Estudios anteriores	3
1.2 Propuesta	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos particulares	5
1.4 Metodología	5
1.4.1 Establecer el propósito del modelo	6
1.4.2 Compilación e interpretación de datos de campo	6
1.4.3 Entendimiento del sistema natural	7
1.4.4 Conceptualización del sistema natural	7
1.4.5 Selección del modelo numérico y software utilizado	8
1.4.6 Calibración y validación del modelo	8
1.4.7 Análisis de sensibilidad	9
1.4.8 Aplicación del modelo	10
1.4.9 Presentación de resultados	11
2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS Y MODELO CONCEPTUAL... 13	
2.1 Descripción de la zona de estudio	13
2.1.1 Localización	13
2.1.2 Extensión	13
2.1.3 Topografía	13
2.1.4 Vías de comunicación	16
2.1.5 Población y actividad económica	17
2.1.6 Clima	18
2.1.7 Hidrografía	20
2.2 Características geológicas del acuífero	22

2.2.1	Estratigrafía.....	22
2.2.2	Estructuras regionales	31
2.3	Características hidráulicas del acuífero	36
2.3.1	Caracterización hidráulica (pruebas de bombeo).....	37
2.3.2	Piezometría	39
2.3.3	Evolución del nivel estático	50
2.3.4	Temperatura del agua subterránea	58
2.3.5	Extracción de agua subterránea por bombeo	59
2.4	Modelo conceptual	60
2.5	Balance hidrogeológico	70
2.5.1	Área y periodos de balance	72
2.5.2	Recarga vertical	72
2.5.3	Entradas y salidas subterráneas	79
2.5.4	Extracción por bombeo	83
2.5.5	Volumen drenado	83
2.5.6	Elementos de la ecuación de balance volumétrico para los diferentes periodos	84
3.	MODELO DE FLUJO	89
3.1	Selección del área modelada	89
3.2	Tipo de modelo	91
3.2.1	Integración vertical de la ecuación de flujo	92
3.2.2	Condición de superficie libre	96
3.2.3	El algoritmo de solución de PTC	97
3.2.4	Aproximación en elemento finito de la ecuación de flujo	98
3.3	Discretización espacial y temporal	102
3.4	Definición de las condiciones iniciales y de frontera del modelo	105
3.5	Asignación de los parámetros del modelo	106
3.5.1	Conductividad hidráulica	107
3.5.2	Coefficiente de almacenamiento	107

3.5.3 Recarga vertical	108
3.6 Calibración del modelo	111
3.7 Predicciones	129
3.7.1 Predicción 1	130
3.7.2 Predicción 2	133
3.7.3 Predicción 3	136
3.7.4 Predicción 4	139
3.8 Análisis de sensibilidad	146
3.9 Ventajas y limitaciones del modelo	148
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
5. BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXO I Tablas	
ANEXO II Ubicación de pozos con estratos de arcilla y/o andesita de acuerdo a su corte litológico.	
ANEXO III Estimación de elevaciones del nivel estático.	
ANEXO IV Estimación de la recarga por el método de los cloruros.	
ANEXO V Balance de agua superficial.	
ANEXO VI Gráficas de datos observados y simulados contra tiempo.	

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
2.1. Ubicación del área de estudio.....	14
2.2. Extensión y poblados ubicados en el área de estudio.....	15
2.3. Relieve topográfico del área del estudio.....	16
2.4. Temperatura media mensual (1921-1999)	19
2.5. Precipitación media mensual (1921-1999)	19
2.6. Evaporación media mensual	20
2.7. Geología del área de estudio	23
2.8. Sección geológica (Guysa, 1996)	25
2.9. Distribución de las captaciones en el área de estudio	37
2.10. Ubicación de los pozos con datos de transmisividad y conductividad hidráulica....	39
2.11. Configuración piezométrica para agosto de 1981.....	43
2.12. Configuración piezométrica para agosto de 1985.....	44
2.13. Configuración piezométrica para agosto de 1990....	45
2.14. Configuración piezométrica para diciembre de 1993.....	46
2.15. Configuración piezométrica para diciembre de 1995.....	48
2.16. Configuración piezométrica para diciembre de 1999.....	49
2.17. Configuración de la evolución piezométrica 81-85.....	51
2.18. Configuración de la evolución piezométrica 85-90.....	52
2.19. Configuración de la evolución piezométrica 90-93.....	53
2.20. Configuración de la evolución piezométrica 93-95.....	55
2.21. Configuración de la evolución piezométrica 95-99.....	56
2.22. Configuración de la evolución piezométrica 81-99	57
2.23. Temperatura del agua subterránea	59
2.24. Direcciones del flujo en condiciones iniciales del acuífero.....	66
2.25. Esquema conceptual del flujo en el estado original del acuífero.....	66
2.26. Vista en planta del modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.....	69
2.27. Modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.....	69

2.28.	Elementos de un balance hidrogeológico (tomado de Spitz y Moreno, 1996)	71
2.29.	Área del balance de masa	73
2.30.	Zonas de recarga por retornos de riego y fugas en la red de agua potable.....	79
2.31.	Estimación de los parámetros del balance para los periodos 85-90, 90-93 y 93-95.....	86
3.1.	Configuración promedio de la piezometría y fronteras del modelo.....	90
3.2.	Representación del acuífero tridimensional integrado en la vertical	93
3.3.	Funciones base lineales	101
3.4.	Malla en elemento finito y condiciones de frontera del modelo	104
3.5.	Sección X-X'	104
3.6.	Sección Y-Y'	105
3.7.	Conductividad hidráulica (m/día) de entrada al modelo	108
3.8.	Porcentaje de recarga por lluvia estimado por el método de los cloruros	110
3.9.	Lámina de retorno por riego y fugas de la red de agua potable en m/día asignada al modelo	111
3.10.	Valores calibrados de la conductividad hidráulica en m/día	114
3.11.	Valores calibrados del rendimiento específico	115
3.12.	Distribución espacial de los errores para el año de 1993	117
3.13.	Distribución espacial de los errores para el año de 1995	118
3.14.	Distribución espacial de los errores para el año de 1999	119
3.15.	Datos observados vs datos simulados para 1993	120
3.16.	Datos observados vs datos simulados para 1995	120
3.17.	Datos observados vs datos simulados para 1999	121
3.18.	Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 0051-G	121
3.19.	Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 0070-G	122
3.20.	Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 0102-G	122
3.21.	Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 553	123
3.22.	Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 563	123
3.23.	Configuración piezométrica simulada para 1985 (msnm)	124
3.24.	Configuración piezométrica simulada para 1990 (msnm)	125
3.25.	Configuración piezométrica simulada para 1993 (msnm)	126

3.26.	Configuración piezométrica simulada para 1995 (msnm)	127
3.27.	Configuración piezométrica simulada para 1999 (msnm)	128
3.28.	Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 1)	131
3.29.	Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 1)	132
3.30.	Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 2)	134
3.31.	Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 2)	135
3.32.	Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 3)	137
3.33.	Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 3)	138
3.34.	Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 4)	141
3.35.	Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 4)	142
3.36.	Abatimiento promedio para el periodo 1999-2010 de acuerdo con los cuatro escenarios de predicción	143
3.37.	Abatimiento promedio anual para el periodo 1999-2010 de acuerdo con los cuatro escenarios de predicción	144
3.38.	Diferencia entre el nivel piezométrico simulado de la predicción 4 y la predicción 1 (m)	145
3.39.	Análisis de sensibilidad para el año de calibración 1993	147
3.40.	Análisis de sensibilidad para el año de predicción 2010	147

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
2.1. Registro de la temperatura , precipitación y evaporación media mensual	18
2.2. Precipitación media anual	74
2.3. Precipitación media anual por periodo	75
2.4. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1985	80
2.5. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1990	80
2.6. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1993	81
2.7. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1995	81
2.8. Resumen de entradas y salidas subterráneas	82
2.9. Resumen de los volúmenes de extracción	83
2.10. Volumen drenado	84
2.11. Balance volumétrico	85
2.12. Déficit por periodos	87
3.1. Periodos de simulación	103
3.2. Cargas asignadas a las condiciones de frontera del tipo I	106
3.3. Datos de la transmisividad para la zona de Obrajuelo	107
3.4. Lámina de recarga natural asignada al modelo de acuerdo con las zonas presentadas en la figura 3.8	109
3.5. Comparación del balance de masa simulado contra el calculado	129
3.6. Abatimiento promedio para los escenarios de predicción (1999-2010)	143
3.7. Diferencia entre los abatimientos para todo el periodo de predicción de los diferentes escenarios (columna – renglón)	143

1. INTRODUCCIÓN

El territorio mexicano presenta una gran variedad de características geohidrológicas en sus casi dos millones de kilómetros cuadrados de extensión. Los acuíferos en explotación se pueden dividir en tres grandes grupos en función del tipo de formación geológica que se explota (CNA, 1994). El primer grupo está constituido por acuíferos en roca sedimentarias no consolidadas tales como gravas, arenas y arcillas. Destacan por su importancia los acuíferos en las planicies costeras del Océano Pacífico, de los golfos de California, Tehuantepec y de México. El segundo grupo está formado por afloramientos amplios de rocas calizas que cubren extensiones muy importantes. La Península de Yucatán, está formada casi en su totalidad por rocas calizas ampliamente permeables y de gran potencial productor. En Coahuila y Nuevo Leon, se tienen extensiones considerables de rocas carbonatadas que suministran volúmenes importantes de agua subterránea. Un tercer grupo de acuífero potencial es el constituido por zonas de rocas volcánicas, como ocurre en gran parte de la porción central del país y en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Baja California Norte y Tamaulipas, así como en zonas muy localizadas del sur del país. En este tipo de acuíferos, el termalismo es muy frecuente. El acuífero del valle de Querétaro, motivo del presente trabajo, forma parte de este tercer grupo de acuíferos.

En todas las cuencas hidrológicas del país el crecimiento demográfico, industrial y agrícola ha traído como consecuencia mayores demandas de agua. Esto se ha visto acentuado en las cuencas que no cuentan con recursos hídricos superficiales suficientes para satisfacer dichas demandas. En otras cuencas se ha incrementado drásticamente el número de perforaciones profundas en los últimos años, lo que ha provocado, que el balance hidrológico se haya modificado al sobrepasar la extracción por bombeo a la recarga natural del sistema. Esto origina que en la actualidad el abastecimiento de agua se realice a costa del almacenamiento de los acuíferos.

La modelación numérica de acuíferos es una herramienta que ha adquirido un fuerte desarrollo en los últimos años. Ésta puede ser de gran utilidad, tanto en las etapas previas del conocimiento de un acuífero, como en las etapas finales en las que se pretende hacer

una predicción de una formación acuífera sujeta a diferentes políticas de explotación. La utilización de los modelos numéricos en México inicia a fines de los años sesentas, en esa misma época aparecen los primeros modelos numéricos de importancia en la literatura técnica norteamericana. Destacan entre ellos los modelos numéricos en los que se utilizan los métodos de diferencias finitas y elemento finito (CNA, 1994).

En el valle de Querétaro los efectos irreversibles que ha provocado el sobre bombeo son entre otros, el acelerado descenso de los niveles de agua subterránea con la consecuente compactación y asentamiento diferencial del terreno, lo que ha generado agrietamientos que favorecen en un momento dado la migración directa de agua contaminada al acuífero. Actualmente el panorama es alarmante al sobrepasar la extracción por bombeo a la tasa de alimentación de acuíferos, los efectos negativos han tenido otros acumulativos: el rendimiento de los pozos disminuye con la profundidad y para compensar el decremento se requiere perforar pozos cuyos desarrollos se traducen en enormes costos de operación. La contaminación en superficie por desechos de toda índole alcanzará con mayor rapidez al agua subterránea y enormes volúmenes se verán inutilizados sin ser aprovechados.

Ante esta problemática la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEAQ) analizó diferentes alternativas de abastecimiento para solucionar los problemas señalados anteriormente, una de éstas es la explotación de las aguas superficiales del río Extóraz mediante la construcción de una presa.

Para aprovechar los escurrimientos de la cuenca del río Extóraz, se diseñó una obra de contención que permitirá almacenar y derivar un gasto constante de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ que se conducirán por medio de una tubería hasta la ciudad de Santiago de Querétaro. De este gasto se le entregará a la ciudad de Querétaro 2189 lps con un régimen de operación de 24 horas diarias.

La zona de estudio comprende una superficie de 927.5 km^2 , incluye al acuífero del valle de Querétaro, ubicado en la porción sur oriental del estado de Querétaro; y al acuífero del valle

de Obrajuelo ubicado en el estado de Guanajuato colindando con el acuífero del valle de Querétaro.

1.1 Estudios anteriores

De acuerdo con datos de la CEAQ, este valle cuenta con un historial de niveles de agua subterránea que se inicia desde el año de 1970 con 20 pozos piloto monitoreados. Para 1988 ya se contaba con 54 y a partir de 1990 se miden sistemáticamente dos veces por año a través de una red de más de 70 captaciones.

Como parte de los estudios realizados para conocer la situación del acuífero y con la finalidad de utilizarlo en la planeación de la explotación del recurso subterráneo, se ha desarrollado un modelo de flujo para el acuífero del valle de Querétaro que en diferentes años ha sido actualizado y modificado. En 1991 Geofísica De Exploraciones Guysa, S.A. (Guysa) realizó el estudio geohidrológico integral del valle de Querétaro y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos, cuyos objetivos fueron conocer la situación hidrodinámica que guardaba el valle de Querétaro en cuanto a sus relaciones de recarga y descarga de agua subterránea; estimar los volúmenes de reserva susceptibles de ser explotados sin incrementar drásticamente el deterioro del balance volumétrico; y mediante el modelo matemático calcular la posición de los niveles de agua subterránea para diferentes tiempos con distintas políticas de extracción. De 1992 a 1996 la CEAQ realizó una actualización del modelo del acuífero del valle de Querétaro en donde el mismo fue calibrado para cada año. En 1994 el modelo fue utilizado para desarrollar un modelo de optimización, elaborado para la CEAQ, que como objetivo tuvo la optimización del uso del agua en diferentes políticas de manejo. Para 1996 la empresa Guysa desarrolló un estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación del acuífero del valle de Querétaro. En el año 2002 la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en un convenio con la CEAQ realizó un estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro, en este estudio se modeló de manera conjunta los acuíferos del Estado de Querétaro (Buena Vista, Querétaro, Huimilpan, Chichimequillas,

San Juan del Río-Pedro Escobedo y Ezequiel Montes-Tequisquiapan) para el periodo 1992-1995 y se realizaron predicciones al año 2000 bajo diferentes escenarios de explotación.

En los trabajos anteriores se realizó la modelación del acuífero del valle de Querétaro tomando como frontera del acuífero los límites estatales con el estado de Guanajuato y en ninguno de ellos se incluye la zona del valle de Obrajuelo que está directamente conectado al valle de Querétaro. En el presente estudio se observa que justamente en los límites del estado de Querétaro (al oeste del valle de Querétaro) se tiene extracción importante del acuífero tanto del lado del valle de Querétaro como del lado del valle de Obrajuelo, observándose, en esta zona, abatimientos importantes del acuífero por lo que no fue posible establecer una frontera física o natural para el acuífero del valle de Querétaro y se estudian de forma conjunta ambos acuíferos. Por otro lado en este trabajo se propone utilizar el simulador Princeton Transport Code (PTC) que usa la ecuación que gobierna el flujo de agua subterránea y está discretizado en elemento finito a diferencia del simulador utilizado en los trabajos anteriores (MODFLOW) que está discretizado en diferencias finitas.

1.2 Propuesta

El presente trabajo propone la calibración de un modelo de flujo que simule de manera conjunta al acuífero del valle de Querétaro y el acuífero del valle de Obrajuelo, calibrar el modelo para los años 1985, 1990 y 1993, validar el modelo con datos que se tienen para los años de 1995 y 1999 y una vez validado realizar predicciones al año 2010 bajo diferentes escenarios de explotación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es calibrar un modelo de flujo para el acuífero del valle de Querétaro que contribuya a evaluar el comportamiento del acuífero a futuro en diferentes escenarios de explotación.

1.3.2 Objetivos particulares

- Desarrollar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.
- Calibrar un modelo numérico de flujo subterráneo.
- Evaluar los niveles del acuífero a futuro en los siguientes escenarios de explotación:

Predicción 1. Suponer que el bombeo se mantiene constante.

Predicción 2. Suponer que el bombeo aumenta en un 10 %.

Predicción 3. Suponer que el bombeo en todo el acuífero disminuye en un 10%.

Predicción 4. Disminuir el volumen de bombeo en el valle de Querétaro de acuerdo con el caudal estimado que aportará a la ciudad de Querétaro el proyecto de la presa Extóraz conservando constante el bombeo en la zona de Obrajuelo

1.4 Metodología

Para la metodología a seguir en este trabajo se tomaron como base los protocolos de modelación propuestos por Spitz y Moreno (1996), y Anderson y Woessner (1992). Los pasos de modelación son los siguientes:

- Establecer el propósito del modelo
- Compilación e interpretación de los datos de campo
- Entendimiento del sistema natural
- Conceptualización del sistema de agua subterránea
- Selección del modelo numérico y software utilizado
- Calibración y validación del modelo
- Análisis de sensibilidad
- Aplicación del modelo
- Presentación de resultados

1.4.1 Establecer el propósito del modelo.

Con base en los trabajos existentes sobre la zona de estudio se planteó el objetivo general de este trabajo y se realizó una propuesta de modelación.

1.4.2 Compilación e interpretación de datos de campo

Para la compilación de los datos fue necesaria la revisión del mayor número de estudios e informes realizados con anterioridad y solicitar de información geohidrológica a las instituciones gubernamentales, estatales o empresas privadas. Los datos de campo que se compilaron e interpretaron son los siguientes: datos de conductividad hidráulica, piezometría, volúmenes de extracción de los aprovechamientos, geología del área de estudio, secciones geológicas, ubicación de fallas y toda la información geohidrológica e hidrológica que pudiera ser útil para el desarrollo del presente trabajo.

Los datos de conductividad hidráulica se tomaron de las pruebas de bombeo reinterpretadas en el estudio de Guysa, 1996 y datos obtenidos de los estudios de Lesser, 1995 e Ingeniería Computarizada, 1998. Con los datos de conductividad hidráulica obtenidos se hizo una estimación espacial de este parámetro con el método de kriging (utilizando el programa Surfer 8) y con base a esta estimación se construyeron zonas de igual conductividad hidráulica para asignar éstas posteriormente al modelo numérico.

Los datos de piezometría se obtuvieron de las siguientes fuentes: para la zona del valle Querétaro se obtuvo del estudio de Guysa, 1996 el historial piezométrico que se tiene para el periodo 1970-1995; la CEAQ proporciono información de mediciones del nivel estático para el periodo 1996-2000, para la zona del valle de Obrajuelo la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Guanajuato (CEAG) proporcionó información de niveles estáticos para el periodo 1995-2000. Se construyeron hidrógrafos de los pozos para detectar anomalías de los datos de nivel estático disponibles y se estimaron datos de elevación del nivel estático. Con la información de los niveles estáticos disponibles y la ayuda del programa Surfer 8 (aplicando el método de kriging) se realizó la configuración

piezométrica para los años con que más información se contaba que son 1981, 1985, 1990, 1995 y 1999, se obtuvieron las evoluciones piezométricas entre los periodos 81-85, 85-90, 90-93, 93-95 y 95-99.

Los volúmenes de extracción por aprovechamientos se tomaron de una reinterpretación del volumen de extracción de los pozos del acuífero para el periodo 1938-1996 presentada en el estudio de Guysa (1996). Para el periodo 1996-2000 por sugerencia de la CEAQ se consideró que el volumen de extracción del acuífero se mantuvo constante respecto a la extracción que se tenía para el año de 1996. La CEAQ por otra parte proporcionó los volúmenes de extracción de los aprovechamientos ubicados en el valle de Obrajuelo.

La información respecto a la geología, planos geológicos y estructuras geológicas de la zona de estudio se tomó principalmente de los estudios Guysa (1996), Lesser (1995), Ingeniería Computarizada (1998) y Alaniz Álvarez et al., (2001).

1.4.3 Entendimiento del sistema natural.

La interpretación de toda la información recopilada fue una herramienta importante para el entendimiento del sistema natural, con la piezometría se definieron las direcciones del flujo subterráneo identificándose las zonas de recarga subterránea así como las zonas en donde se tienen abatimientos importantes. Con la información geológica y las secciones geológicas se definieron las unidades hidroestratigráficas del acuífero y se delimitó el dominio de la modelación numérica.

1.4.4 Conceptualización del sistema natural.

Una vez entendido el sistema natural se estableció el modelo conceptual de la zona de estudio. En el modelo conceptual se definieron el tipo de acuífero, unidades hidroestratigráficas, las direcciones principales del flujo, sistemas de flujo, las zonas de recarga y descarga horizontal, conexión con otros acuíferos, fuentes de recarga vertical, zonas de abatimiento, ubicación y comportamiento de las fallas geológicas entre otras

características de la dinámica actual del acuífero, y se realizó un esquema del modelo conceptual. Con la ayuda del modelo conceptual se realizó un balance de aguas para estimar la magnitud de los flujos de entrada y salida del acuífero y los cambios que se tienen en el almacenamiento. Durante la calibración del modelo el balance de agua estimado se comparó con el balance de agua arrojado por el modelo.

1.4.5 Selección del modelo numérico y software utilizado.

Para el modelo de flujo se utilizó el simulador PTC. Este simulador soluciona las ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo y el transporte de contaminantes (en este trabajo únicamente se utilizó la solución de flujo). Para la solución de las ecuaciones PTC utiliza una discretización en elemento finito (en la horizontal) y diferencias finitas (en la vertical).

PTC tiene una interfaz gráfica (GUI por sus siglas en inglés) en la plataforma que proporciona Argus ONE para la programación de este tipo de interfaces. La GUI de PTC permite definir el problema a solucionar del flujo o contaminación del agua subterránea utilizando las herramientas que ofrece Argus ONE además de permitir el procesamiento de los resultados de modelación.

Se determinó utilizar un modelo de una sola capa (modelo bidimensional) debido a que los datos piezométricos con que se cuenta representan un promedio de la piezometría sobre toda la profundidad del pozo y no se cuenta con información que permita evaluar los gradientes piezométricos verticales.

1.4.6 Calibración y validación del modelo.

Con las herramientas que proporciona Argus ONE se procedió al diseño del modelo con las actividades siguientes: asignación del dominio del modelo, se generó una malla triangular en elemento finito, se definió una sola capa en la vertical (modelo bidimensional), las condiciones iniciales y de frontera, los parámetros de conductividad hidráulica y

rendimiento específico y caudales de extracción (pozos). Para la simulación temporal se asignaron los periodos y los pasos de tiempo. Una vez diseñado el modelo se procedió a realizar la calibración.

La calibración consistió en comparar los resultados del modelo con mediciones de campo disponibles. Se definió qué parámetro de entrada del modelo variar dentro de un rango definido, hasta minimizar en lo posible las diferencias entre los valores simulados y los valores observados.

Los parámetros de entrada al modelo que se eligieron para realizar la calibración fueron la conductividad hidráulica y el rendimiento específico, estos se eligieron por ser los parámetros con más incertidumbre en su estimación. Los resultados de la simulación se compararon con datos de nivel estático medidos en campo para los años de simulación. La medida del error fue el error cuadrático medio. Los años de calibración fueron 1985, 1990 y 1993.

Una vez calibrado el modelo se procedió a realizar la validación del mismo. En la validación se compararon los resultados del modelo con un grupo de datos no usados en la calibración que fueron los años de 1995 y 1999.

La calibración y la validación son aceptadas si el modelo es capaz de reproducir todos los escenarios conocidos y disponibles dentro de un rango aceptable sin la variación de ninguno de los parámetros asignados al modelo. La calibración y la validación son dos de los pasos críticos que preceden la aplicación del modelo.

1.4.7 Análisis de sensibilidad.

De acuerdo con Anderson y Woessner (1992), el propósito de un análisis de sensibilidad es el de cuantificar la incertidumbre en el modelo calibrado causado por la incertidumbre en los parámetros estimados del acuífero, esfuerzos y condiciones de frontera. Un análisis de sensibilidad es un paso esencial en todas las aplicaciones de modelos.

No sólo se tiene incertidumbre para los valores de los parámetros necesarios para nuestros cálculos de diseño, además se tiene incertidumbre acerca de la geometría del sistema que estamos tratando de analizar. Las incertidumbres de litología, estratigrafía y estructura, introducen un nivel de complejidad para el análisis geotécnico e hidrogeológico que se desconoce completamente en otras disciplinas de la ingeniería.

Durante un análisis de sensibilidad, los valores calibrados para la conductividad hidráulica, parámetros de almenaje, recarga vertical y condiciones de frontera se cambian sistemáticamente dentro de un rango previamente establecido. La magnitud de cambios en las cargas de solución calibrada es una medida de sensibilidad de la solución para ese parámetro en particular. Los resultados del análisis de sensibilidad se reportan como los efectos de cambio del parámetro sobre la medida del error que se elige como criterio de calibración. Idealmente, se examina el efecto sobre la distribución espacial de los residuos de las cargas.

Para el análisis de sensibilidad del presente trabajo se cambiaron los parámetros de entrada al modelo de la conductividad hidráulica, el rendimiento específico y la recarga vertical variándolos en un -10 %, -20 %, 10 % y 20% respecto al valor que se tenía en el modelo calibrado. Estos parámetros se eligieron por la incertidumbre que se tiene en la estimación de los mismos. Una vez hecha las corridas del modelo con las variaciones de los parámetros antes descritos se estimaron los errores y se determinó para que parámetros el modelo es más sensible.

1.4.8 Aplicación del modelo.

Una vez calibrado y validado el modelo se realizaron simulaciones bajo diferentes escenarios de predicción. Los escenarios de predicción se describen en los objetivos particulares de este trabajo.

1.4.9 Presentación de resultados

Consistió en el postprocesamiento para producir los resultados del modelo. Los resultados se presentan en planos o figuras que muestran las distribuciones de las cargas hidráulicas simuladas para el año de predicción (2010), abatimientos que presenta el acuífero para el periodo de predicción (1999-2010), tabla con abatimiento promedio que presenta el acuífero en el periodo de predicción de acuerdo con los diferentes escenarios de explotación. Se presentan además las conclusiones y recomendaciones más importantes obtenidas en este trabajo.

2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS Y MODELO CONCEPTUAL

2.1 Descripción de la zona de estudio

2.1.1 Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada en la porción sur-oriental del Estado de Querétaro a 210 Km de la ciudad de México; sus coordenadas geográficas van desde los 20° 28' 07'' a 20° 45' 03'' de latitud Norte y 100° 19' 14'' a 100° 34' 20 de longitud Oeste. En el lado norte se limita con la divisoria natural de aguas superficiales que divide al valle de Querétaro con el de Buenavista, cuya línea pasa por la localidad de Santa Rosa de Jáuregui. El lado sur se limita con una línea imaginaria que pasa por el cerro El Cimatorio y el cerro Buenavista; el lado oriental y occidental también se limitan con líneas imaginarias, el primero con la localidad de Villa del Marqués y el segundo occidental con el poblado de Obrajuelo en el estado de Guanajuato. La figura 2.1 muestra la ubicación del área de estudio.

2.1.2 Extensión

La zona de estudio comprende una superficie rectangular vertical de 35 Km de largo por 26.5 Km de ancho, el área total es de 927.5 Km², e incluye a la ciudad de Querétaro, a los poblados de Corregidora, Jurica, Tlacote El Bajo, el corredor industrial Benito Juárez y Obrajuelo. Por el lado occidental queda incluida la zona agrícola del municipio Querétaro, y de Obrajuelo. En la figura 2.2 se observan la extensión y los poblados ubicados en el área de estudio.

2.1.3 Topografía

La superficie del área presenta una topografía accidentada donde predominan procesos fluviales erosivos controlados por estructuras tectónicas. La parte sur, norte y este del área, está constituida por sierras de laderas tendidas con lomeríos de forma alargada con

orientación norte-sur desde Santa Rosa de Jáuregui hasta el poblado de Huimilpan, que están formadas por rocas volcánicas de edad cuaternaria y que, se extienden desde el Cerro El Cimatario al Sur hasta Obrajuelo y Mompani al Norte. La principal elevación dentro del área, corresponde al Cerro Cimatario (2340 msnm).

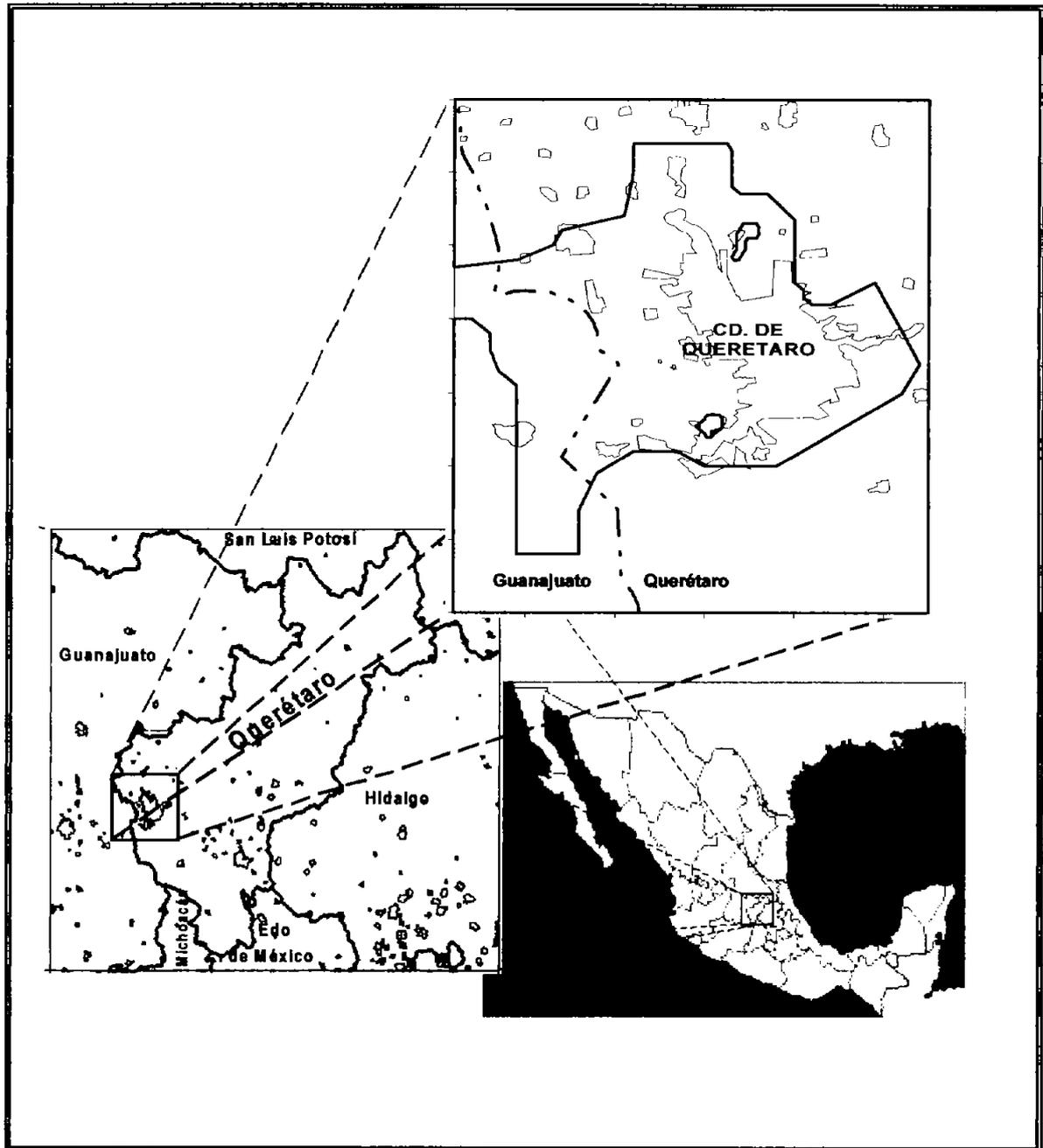


Figura 2.1 Ubicación del área de estudio.

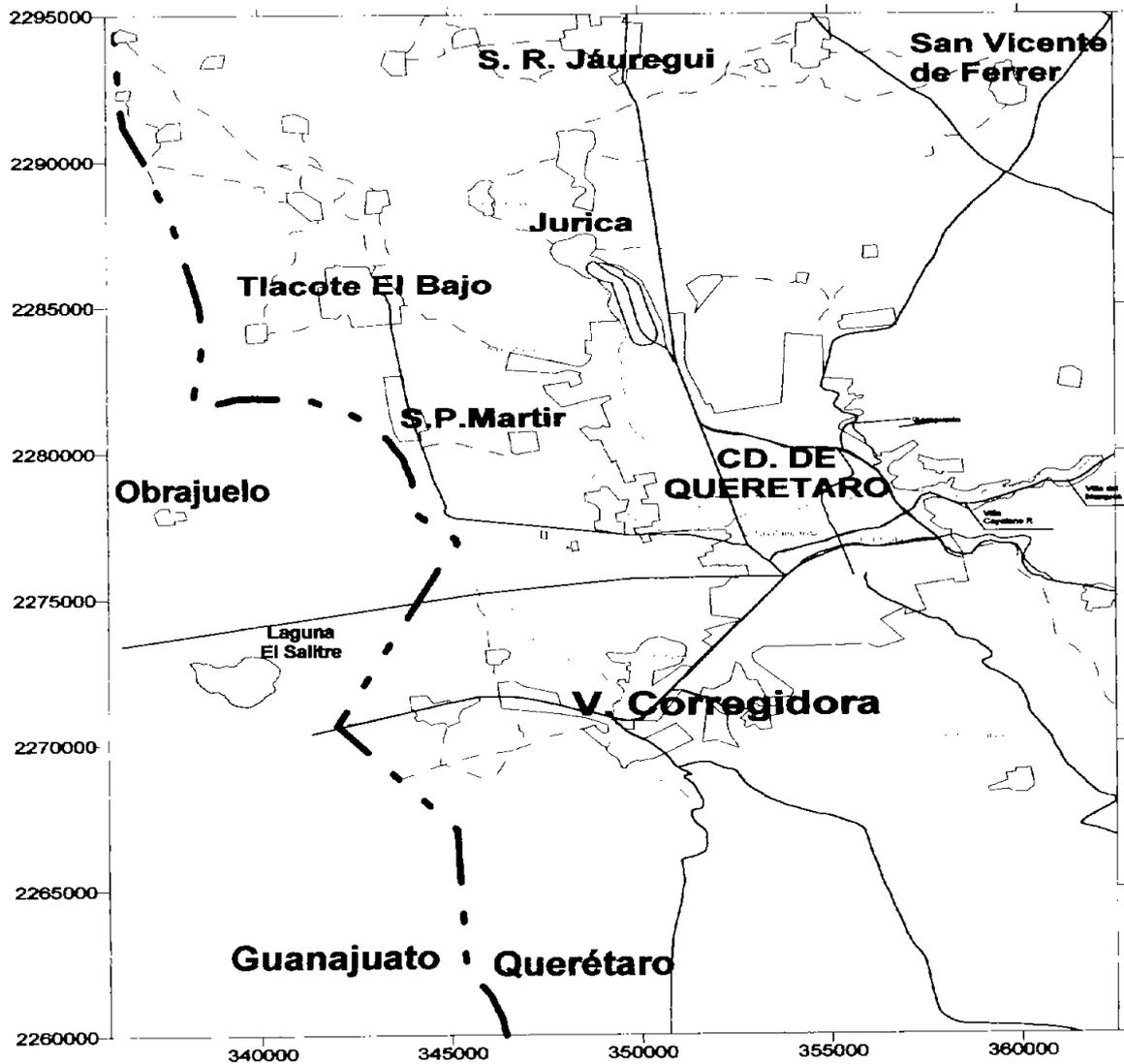


Figura 2.2. Extensión y poblados ubicados en el área de estudio.

La parte sur y centro del área está constituida por una planicie, que presenta una altitud máxima de 1800 msnm y que se encuentra en su totalidad urbanizada. La ciudad de Querétaro se desarrolló principalmente dentro de esta planicie (Guysa, 1996). La figura 2.3 muestra el relieve topográfico del área de estudio.

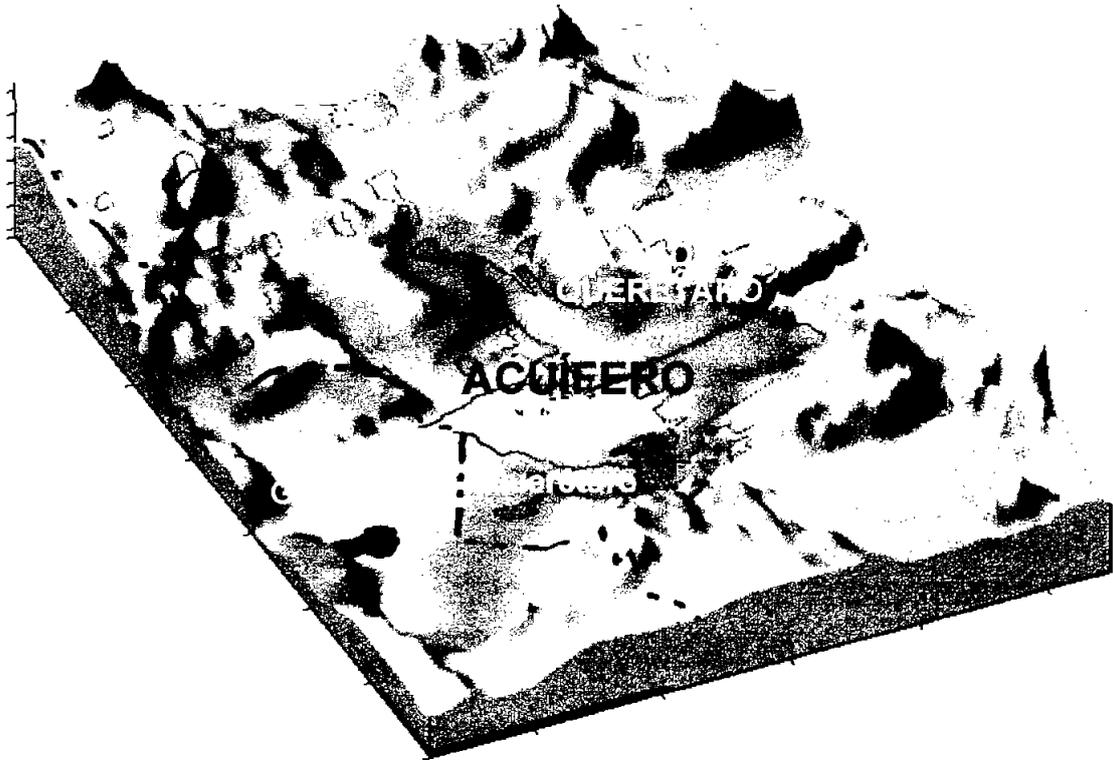


Figura 2.3. Relieve topográfico del área de estudio.

2.1.4 Vías de comunicación

La amplia cobertura de la red caminera del estado, permite una ágil comunicación entre la mayoría de sus localidades, así como son las ciudades de México, Guanajuato y San Luis Potosí, entre otras (página Web del INEGI, 2004).

Carreteras

Los ejes federales que comunican a la ciudad de Querétaro son: la autopista México-Querétaro (No. 57), la carrera federal No.120, que proviene de Morelia, Michoacán y el eje No. 45 que entronca con la carretera No. 57. Esta infraestructura vial se fortalece con los caminos estatales y vecinales que se derivan de las rutas antes mencionadas.

Ferrocarriles

El sistema ferroviario del estado, tiene gran importancia en la economía del país, pues por su territorio cruzan vías que comunican a la ciudad de Querétaro con la zona fronteriza norte, con el centro y la capital de la República, facilitando tanto la salida de productos como la entrada de materias primas.

Aeropuertos

El servicio de transporte se complementa con la terminal aérea establecida en la ciudad de Querétaro.

2.1.5 Población y actividad económica.

La zona de estudio comprende a los municipios de Querétaro y Corregidora en los que habita poco más del 50% de la población del estado, estimada en 715,944 habitantes (INEGI, 2000).

De acuerdo con la información estadística obtenida del Sistema Municipal de Base de Datos (SIMBAD) de la página Web del INEGI, (2004), la principal actividad económica desarrollada por la población de los municipios mencionados, es la de servicios con un 38.9 % del total de su población, seguida por la industria de la transformación (24.5 %), el comercio (18.0 %), la construcción (7.8 %), actividades de gobierno (4.6 %) y el sector agropecuario ocupa únicamente al 2 % de la población asentada en la zona estudio. El 4.2 % restante lo ocupan en minería, electricidad y agua, y otras actividades no identificadas.

En esta porción del estado se concentra parte de la industria manufacturera, de productos alimenticios, textil, metal-mecánicos, eléctricos y químicos más importantes del país, así como también es notoria su participación en el sector turístico, considerándose un patrimonio nacional por su valor histórico.

2.1.6 Clima

El conocimiento de los factores climatológicos es muy importante para estimar la recarga al acuífero, ya que el balance en el ciclo hidrológico natural es lo que define los volúmenes de agua excedentes o deficitarios del sistema.

El clima del valle de Querétaro está condicionado a los accidentes del relieve topográfico y a los factores geográficos definidos por las diferentes altitudes de la Sierra Madre Oriental, que funciona como barrera orográfica limitando el paso de los vientos marítimos precedentes del Golfo de México, debido a esto se presenta en el valle de Querétaro un clima semiseco Bs₁ el cual a su vez se subdivide en semiseco semicálido y semiseco templado (CEA-UAQ, 2002).

Temperatura

La temperatura media anual varía de 18° a 19°C. Las áreas donde rige esta variante están situadas en los alrededores de la ciudad de Querétaro, Villa Corregidora, El Marqués, Santa Rosa de Jáuregui, la localidad Paso de Tablas y en la colindancia del municipio de Peñamiller con el estado de Guanajuato (página Web INEGI, 2004). En la tabla 2.1 se presenta el registro mensual de la temperatura y en la figura 2.4 se presenta una gráfica de la temperatura media mensual.

Tabla 2.1 Registro de la temperatura, precipitación y evaporación media mensual.

Concepto	Periodo	Meses											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura	1921 a 1999	15	16	19	21	22.2	22	20	20	20	19	17	15
Precipitación	1921-1998	11	4.6	7.1	18	36.6	103	127	92	89	39	11	9
*Evaporación	1982-1995	106.8	156.3	210.5	240.2	231.2	183.2	161.0	145.5	135.0	134.8	117.7	108.7

FUENTE: INEGI. Temperatura Media en °C., precipitación en mm (estación Querétaro)

*Fuente ERIC II, evaporación media en mm, Estación Pueblito.

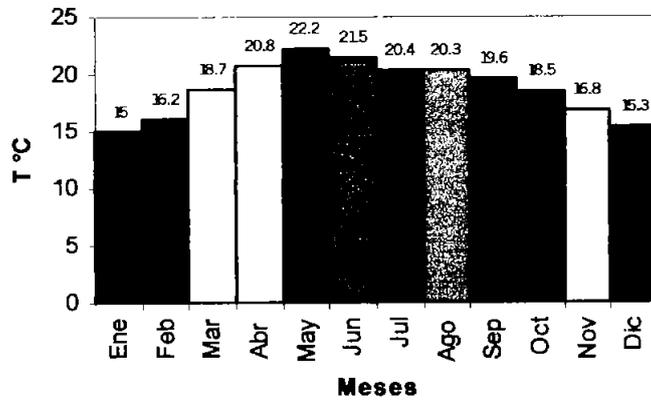


Figura 2.4. Temperatura media mensual (1921-1999).

Precipitación

De acuerdo con los registros de precipitación media mensual los meses más lluviosos se tienen en el periodo mayo-octubre siendo el mes de julio el mes histórico más lluvioso. En la tabla 2.1 se presentan los registros de precipitación mensual y la figura 2.5 muestra una gráfica de la precipitación media mensual.

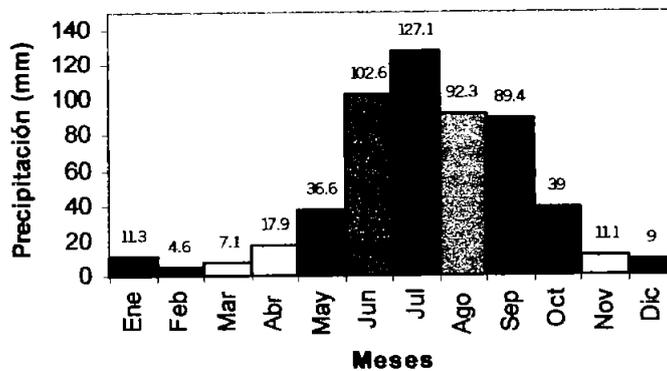


Figura 2.5. Precipitación media mensual (1921-1998).

Evaporación

De acuerdo con los registros de evaporación se observa que los meses con mayor evaporación son los meses de abril y mayo. Los valores de evaporación se presentan en la tabla 2.1. La figura 2.6 muestra la gráfica de la evaporación media mensual.

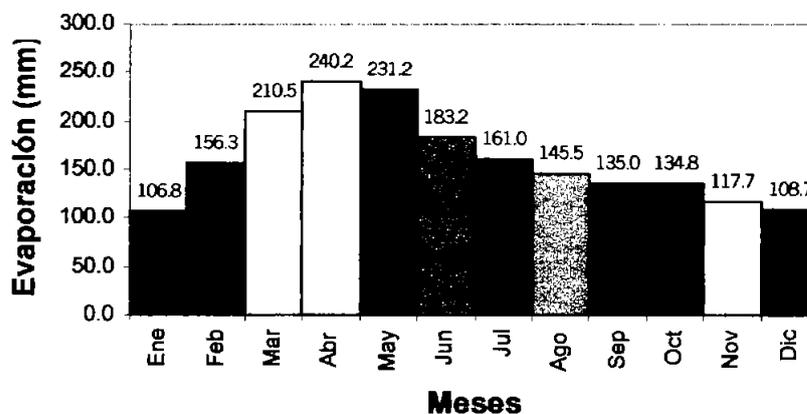


Figura 2.6. Evaporación media mensual.

2.1.7 Hidrografía

La hidrografía de la zona de estudio se tomó principalmente de la pagina Web del INEGI (2004) y del estudio de Guysa (1996).

El estado de Querétaro abarca porciones de dos regiones hidrológicas:

- Pánuco (No. 26) situada en el norte, centro y sureste, con una superficie de 8816.6 km².
- Lerma-Chapala-Santiago (No. 12) en el oeste y suroeste, con un área de 2453.1 km².

La zona del valle de Querétaro se encuentra ubicada en la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago. Esta región se representa por parciales de dos cuencas: río Lerma-Toluca y río Laja, en esta última se encuentra ubicada la zona de estudio.

La cuenca del río Laja comprende 2243 km² en el estado de Querétaro. Entre los escurrimientos más importantes de esta zona se encuentran los ríos Querétaro y El Pueblito.

El río Querétaro fluye en dirección Este-Oeste, desde la Cañada hasta Santa María Magdalena donde se intercepta con el río El Pueblito. Este río es el colector público de aguas residuales e industriales de las poblaciones de Villa Corregidora, El Pueblito, la ciudad de Querétaro y la Zona Industrial Benito Juárez de esta ciudad. De los ríos existentes en la zona de estudio no se tienen evidencias de flujo base ya que no presentan escurrimientos durante la época de estiaje y por lo tanto no se tiene descarga del acuífero a los ríos y se considera despreciable la recarga que pudieran tener los escurrimientos al acuífero ya que éstos son producto de la precipitación.

En el área de estudio existían en condiciones iniciales, cuatro manantiales en las localidades Tlacote El Bajo, La Cañada, El Batán y El Salitre. Uno de los manantiales más importantes se captaba por un túnel en la margen derecha de La Cañada; un manantial de más de 70 lps. De acuerdo con la información histórica recopilada por la empresa Guysa el agua descargada era termal, procedente del valle de Chichimequillas localizado al nororiente del valle de Querétaro.

El agua era conducida por gravedad desde su afloramiento hasta la ciudad de Querétaro a través de la famosa obra de arquería característica de la entidad. En la actualidad no existen descargas de este tipo en el valle ya que los niveles de saturación han descendido drásticamente en los últimos 40 años como consecuencia del bombeo a través de pozos profundos y solo el del Salitre aflora actualmente pero únicamente en épocas de lluvias.

Existen una serie de presas, bordos y vasos de almacenamiento con fines de uso agrícola, control de avenidas y desvío. Estos se encuentran distribuidos en la periferia de las sierras,

siendo las presas más importantes El Batán localizada al sur del valle de Querétaro y El Cajón situada al norte de Jurica. Los bordos tales como Benito Juárez, Britania, Azteca y Bolaños. El cuerpo de mayor capacidad es la presa el Batán, (localizado al sur, fuera del área de estudio), seguido de la presa el Cajón .

2.2 Características geológicas del acuífero.

2.2.1 Estratigrafía

La descripción estratigráfica del área de estudio se basa en los trabajos realizados por las empresas Guysa (1996), Lesser (2000) y Alaniz Álvarez et al. (2001). Se describen diez unidades con sus respectivos nombres, de las cuales nueve son nombres informales, (unidades continentales, volcánicas y lacustre) y solo se presenta una unidad de rocas carbonatadas y lutíticas de un ambiente marino y se encuentra definida formalmente por Wilson en 1955 como Formación Soyatal. La figura 2.7 presenta un mapa geológico de la zona de estudio y la figura 2.8 la sección A-A' que se indica en el plano geológico. A continuación se describe cada una de las unidades desde la más antigua a la más joven.

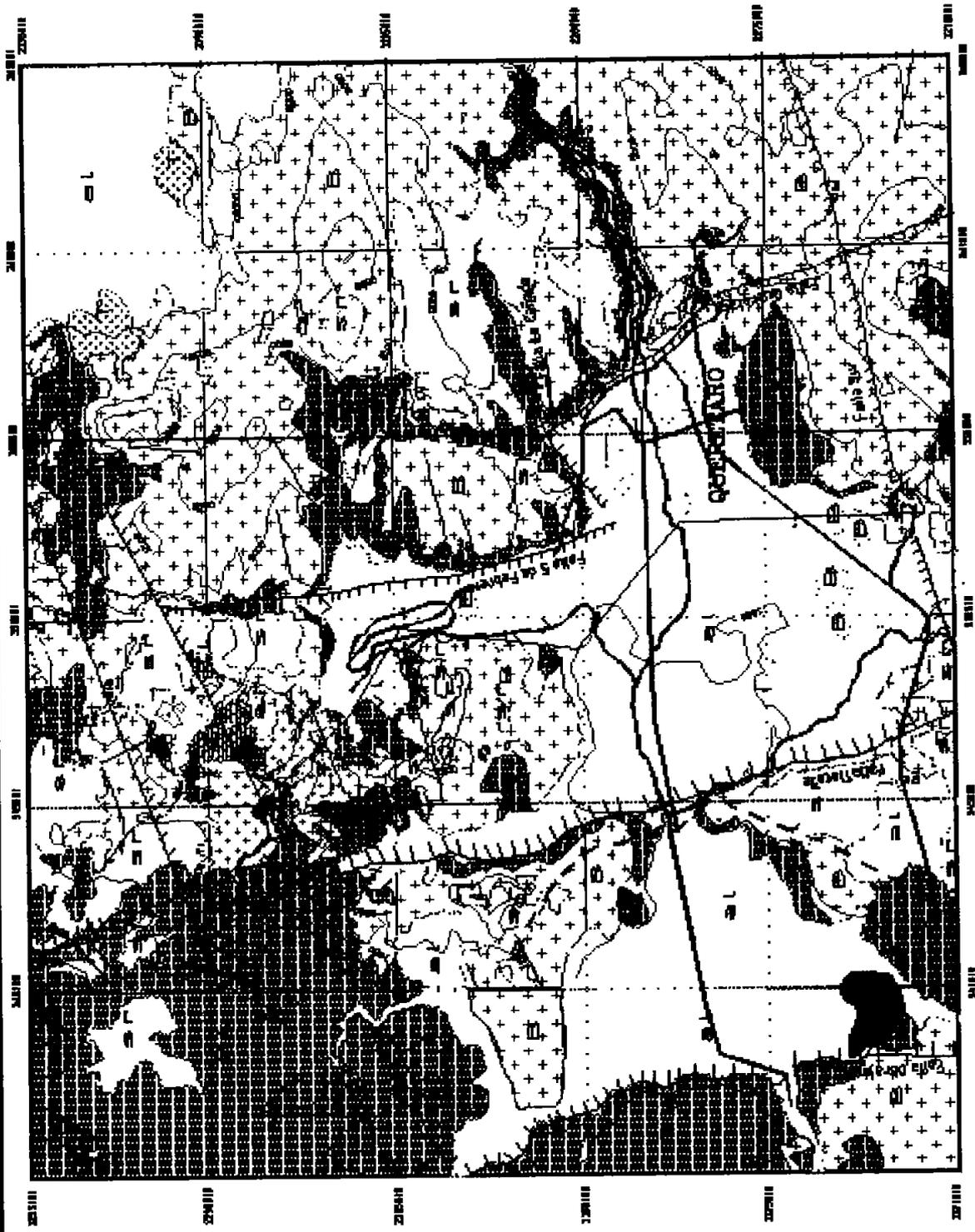


Figura 2.7 Geología del área de estudio.

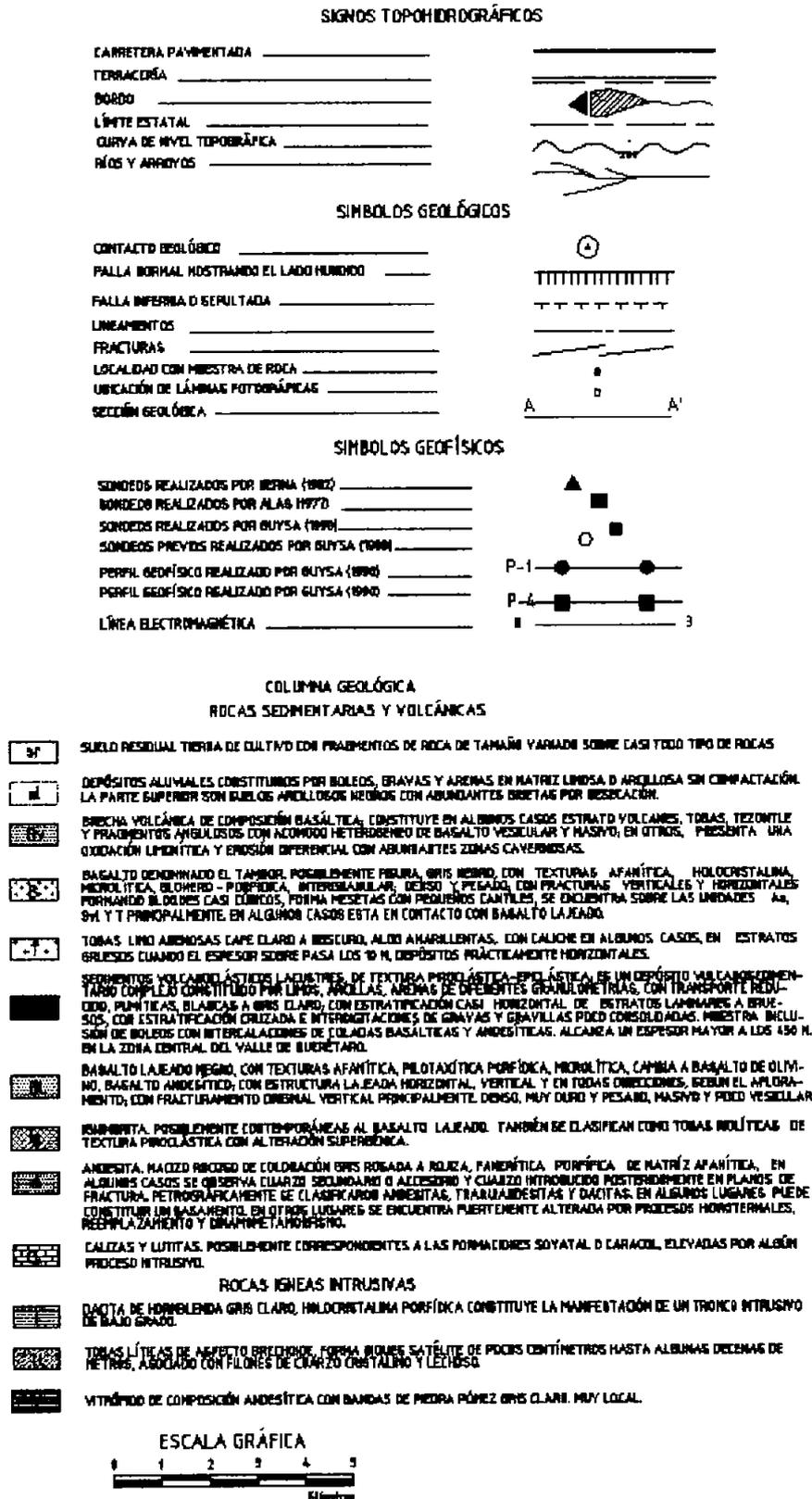


Figura 2.7 (Continuación).

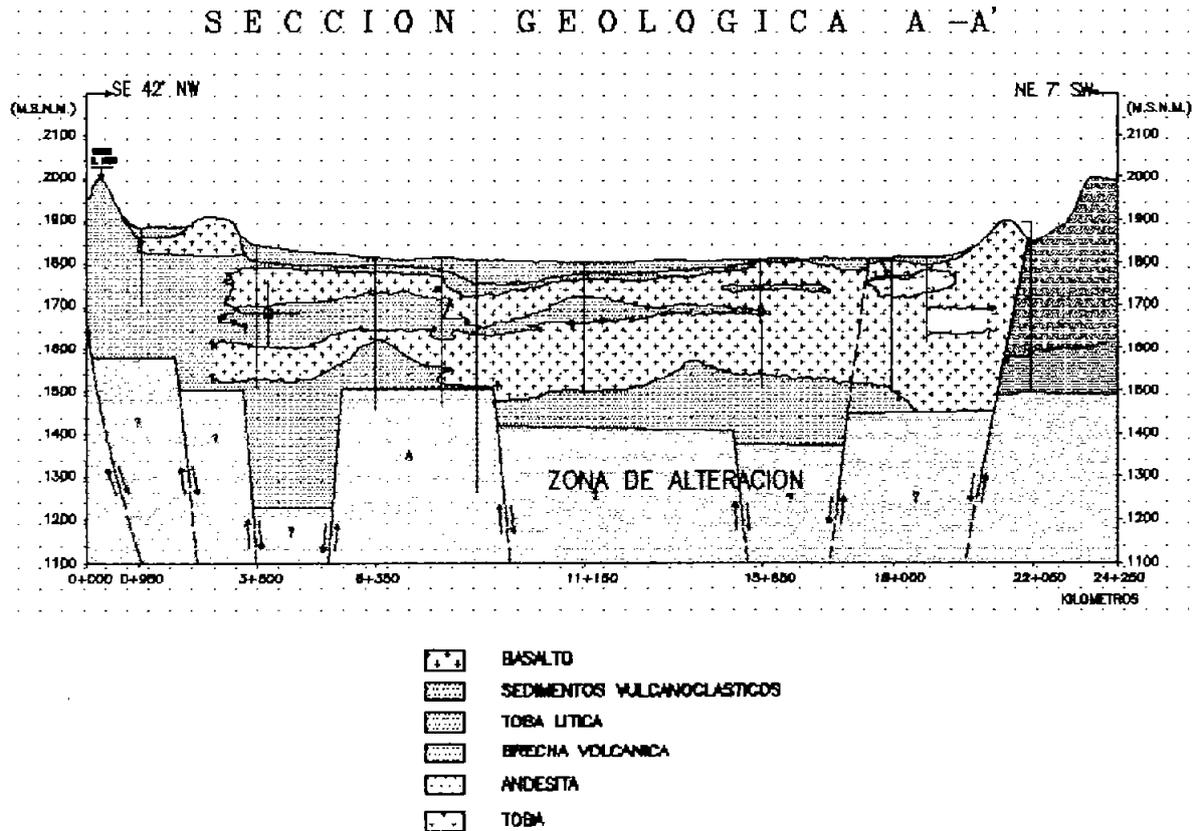


Figura 2.8 Sección geológica (Guysa, 1996).

Calizas y lutitas (Kss)

En la parte noroccidental del área de estudio, en el poblado de Juriquilla, sobre una superficie burdamente semicircular de unos 7 km² aproximadamente, afloran una serie de lutitas calcáreas café grisáceos que intemperizan en café amarillento, con interestratificaciones de capas de caliza gris en estratos de espesor medio delgado (0.30 a 0.05 m); presenta bandas de calcita café claro y blanquecina. Las lutitas se encuentran sumamente plegadas presentando gran fisilidad y clivaje; en otros afloramientos de la misma zona se aprecia una inclinación de las capas de entre 45° y 60° en contacto con dacita porfídica a manera de intrusión dentro de las capas de caliza y lutita. Más de la mitad de esta unidad se encuentra cubierta por depósitos aluviales recientes, sobre todo hacia la parte norte del afloramiento. Esta unidad es de Formación Soyatal y corresponde al

sistema del Cretácico Superior (Turaniense). En algunos estudios se denomina a esta unidad como Formación Caracol, depositada en el mismo ambiente pero es más reciente.

Andesita (A)

Existen afloramientos de Andesita en toda el área estudiada. La unidad va desde una andesita pura hasta una andesita con cuarzo (dacita) y una traquiandesita, debido a la presencia o no, de cuarzo. Para los fines cartográficos no se hace ninguna diferenciación y se consigna con la clave (A).

Tiene texturas desde muy porfíricas de matriz microcristalina, las coloraciones van de gris rojizo a gris rosado, la unidad presenta fracturamientos en todas direcciones, densa y masiva, con fuertes alteraciones de tipo supergénico, y muy fuertes alteraciones por procesos hidrotermales con reemplazamientos como sucede en los afloramientos del poblado de Mompaní y Solana, en donde la roca se ha pulverizado prácticamente y ha perdido totalmente la fábrica original quedando un polvo amarillento y rosado o violáceo muy deleznable.

En la parte noroeste está prácticamente en contacto con las calizas donde se encuentra una pequeña exposición de forma irregular; se observa en el camino que va del poblado El Nabo hacia la Hacienda San Miguelito. Al Sureste de este afloramiento se presentan otras exposiciones de rocas andesíticas que conforman el cerro La Gallina y el poblado de Mompaní y sobre la carretera que va de Jurica al poblado El Nabo.

La andesita alterada se encuentra formando pequeñas zonas de alteración en el poblado La Solana, formando lomas de poca altitud y redondeadas. En la parte central de la zona estudiada se observan otras manifestaciones andesíticas en Los Olvera y en el Cerro El Picacho; hacia la parte sur pequeños afloramientos semicirculares ubicados al sur de Santa Teresa y colindado con el Cerro Tres.

Para los fines de este estudio esta unidad se ha considerado como el basamento, mismo que puede estar sobreyaciendo a la forma calcárea en contacto discordante, no se ha atravesado en su totalidad por ningún pozo en el valle, pero fue detectada en el pozo Loma Bonita del fraccionamiento Jurica encontrando esta roca intercalada con depósitos volcanoclásticos lacustres en la parte basal sin haberse determinado su espesor total. Esta unidad corresponde al sistema Terciario (Oligoceno-Mioceno).

Ignimbritas (Ig)

Las ignimbritas, correspondientes al Terciario (Oligoceno-Mioceno), están formadas por corrientes piroclásticas, tobas soldadas con abundantes fragmentos de cuarzo en una matriz criptocristalina o vítrea. Los derrames vítreos están estratificados y presentan líneas de fluidez bien definidas, las coloraciones son muy variables con tonos rasados a rojo púrpura, así como grises en afloramientos de pómez.

Se localizan algunos afloramientos de poca extensión en las localidades de El Nabo, sobre el arroyo Mompani y en la Cañada.

Basalto lajeado (Bl)

Petrográficamente se clasifica como un basalto andesítico (Alaniz Álvarez et al., 2001 lo nombra Dacita Obrajuelo), es denso y presenta color negro, textura afanítica y porfídica, pilotaxítica, microlítica, con planos de fracturamiento horizontales y verticales, limpios y abiertos. Presenta peculiarmente un fracturamiento secundario por efectos de descompresión tensional produciendo un lajeamiento en diferentes direcciones hasta llegar a ser curvo.

Esta unidad, del sistema Terciario (Plioceno), aflora en diferentes lugares y en diversas dimensiones por toda el área de estudio. De norte a sur se presentan en la Tinaja de Estancia, en San Miguelito y al poniente de Santa Rosa de Jáuregui, en San Isidro el Viejo, al norte de Mompaní y el Nabo y al sur de Tlacote el Bajo.

De acuerdo con Lesser (2000) se tienen mesetas de basalto Terciario muy fluido que por su misma fluidez forma lomeríos de suave pendiente y que se ubican alrededor del valle de Obrajuelo.

Tobas líticas (Tl)

Se trata de tobas vitrocrystalinas de coloración variable de rojiza a violácea, con tonos anaranjados y grises. Presenta una textura de alto grado de preconsolidación, tobácea con abundantes fenocristales de cuarzo y vidrio en matriz microcristalina y en ocasiones criptocristalina, con líneas de fluidez y fragmentos de rocas de naturaleza intermedia, constituida por vidrio y cristales.

Esta unidad del Terciario (Plioceno), quedó al descubierto por el fallamiento distensivo de La Cañada y Tlacote y aflora una mínima parte en el área de la localidad de Menchaca, en las laderas de La Cañada sobre el cauce del Río Querétaro, y suroeste del Nabo sobre el arroyo Mompaní. También se reporto en el subsuelo en los cortes litológicos de los pozos 2041 y 759.

Sedimentos Vulcanolacustres (Svl)

Es un depósito vulcanosedimentario complejo con una serie de materiales no consolidados de textura piroclástica-epiclástica que varían ampliamente en su granulometría, desde detritos poco transportados semiangulosos a redondeados, muy gruesos (boleos), hasta limos arcillas con coloraciones color crema, rojizas y verdosas. Las arenas son de color blanco pardo, pumfíticas y van desde muy finas, a muy gruesas; algunas parcialmente consolidadas.

Las más gruesas son gravillas color café, bien redondeadas con granulometría uniforme prácticamente limpias de materiales finos; la estructura en general es prácticamente horizontal o con una leve pendiente en algunos casos; presenta estratificación cruzada con

estratos gruesos a laminares e interdigitados entre sí; algunos son poco consolidados y otros deleznales.

Estos depósitos del Terciario (Plioceno al Reciente), existen prácticamente en toda el área estudiada y representa el proceso exógeno más extenso ya que rellenó el graben de Querétaro hasta formar la planicie; de hecho estos materiales forman el acuífero granular del valle. Los materiales son ampliamente utilizados como bancos de préstamo para fabricación de tabique ligero y rellenos de carreteras y otro tipo de construcciones, existiendo innumerables excavaciones profundas.

Basalto (B)

Se han descrito numerosos afloramientos en forma magascópica de esta unidad en toda la zona de estudio y se han clasificado como basalto de olivino negro (Alaniz Álvarez et al., 2001 lo nombra Basalto Querétaro) con texturas afanítica, holocristalina, microlítica, glomero-porfídica e intergranular muy denso y pesado.

Es la unidad que conjuntamente con los depósitos aluviales conforman la mayor parte de los afloramientos presentes en la zona de estudio; forma extensas mesetas coronadas por coladas lávicas, terminadas en pequeños cantiles de 1 a 5 m de espesor con una fisonomía característica de grandes bloques cúbicos. Por las expresiones fisiográficas que presenta se estima que son coladas producidas a través de fisura en zonas de distensión, y que en el centro del valle de Querétaro se observan en los cerros La Cruz, Las Campanas, Cerro Gordo y Cerro El Tambor entre otros.

Esta unidad se considera como el último de los eventos del vulcanismo de la naturaleza básico alcalino surgido en el Cuaternario entre el Pleistoceno y Holoceno.

Brecha volcánica (Bv)

De coloraciones gris negro a rojiza, textura brechoide causada por alteración en los minerales féreos de la matriz, imparte una rubefacción intensa a la roca; también se aprecian bastantes oquedades dentro de la brecha volcánica algunas de dimensiones considerables, lo que presenta un aspecto de topografía muy abrupta.

Se observa en la cima del cerro Cimatorio, constituye el cerro El Nabo, sobre las márgenes del Río Querétaro, sobre el corte de la carretera al Penal, en el extremo noroccidental de la zona estudiada, Cerro de Las Campanas, en las estribaciones al norte del cerro Cimatorio, en el Cerrito Colorado, al sur del cerro del Cimatorio. En algunas localidades se presentan lomeríos suaves en canteras para obtención de tezontle rojo así como en profundos cortes como en la entrada de la ciudad de Querétaro, sobre la autopista México-Querétaro. Unidad geológica perteneciente al Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno).

Aluvión y/o suelo residual (Al/Sr)

Su litología está constituida por gravas y boleos en matriz arcillosa, limosa y arenosa, con espesores de unos cms hasta 70 u 80 m detectados en la zona central del valle

De acuerdo con los cortes litológicos de pozos ubicados en la zona de estudio se tiene la presencia de estratos de arcilla principalmente en la zona central de la ciudad de Querétaro extendiéndose hacia la Zona Industrial y San Pedro Mártir. Hacia la zona de Villa Corregidora y los límites con Guanajuato se tiene también la presencia de arcillas en menor cantidad, pero con algunos pozos con espesores de hasta más de cien metros (ver análisis en el Anexo II).

El aluvión constituye propiamente el valle de Querétaro y el valle de Obrajuelo, forma la gran planicie del centro del valle de Querétaro. Por otro lado el suelo residual se encuentra generalmente sobre casi todo tipo de rocas, con mayor abundancia sobre terreno basáltico,

por ello se utilizan para tierra de cultivo ya que permite la infiltración del agua de lluvia a estratos inferiores.

Se observan depósitos constituidos por gravas, arenas y arcillas sobre los flancos de las elevaciones topográficas en la parte sur del valle de Obrajuelo-El Salitre que afloran al pie de las fallas (Lesser, 2000).

Rocas ígneas intrusivas (I)

Un ejemplo de la presencia de estas unidades se encuentra en las inmediaciones del poblado y fraccionamiento de Juriquilla, al norte de la ciudad de Querétaro. Algunos estudios han inferido que los afloramientos de rocas cretácicas de esta zona fueron levantado por fenómenos intrusivos.

Por otra parte se encontraron evidencias de procesos metamórficos de contacto entre la dacita y las calizas-lutitas levantadas, así como evidencias de xenolitos del basamento andesítico levantados conjuntamente con la dacita, en la parte periférica (Guysa, 1996).

2.2.2 Estructuras regionales

A continuación se describen las estructuras originadas por el tectonismo ocurridos en el Terciario ya que fueron los principales moderadores del relieve en la zona. La localización de las fallas se puede observar en la figura 2.7.

Graben de Querétaro

Corresponde a un extenso valle de forma poco alargada en dirección Noroeste-Sureste formado en el Oligoceno-Mioceno. Se encuentra relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos vulcanoclásticos lacustres potentes. Estos materiales están parcialmente saturados de agua y forman el acuífero del valle de Querétaro. De acuerdo con estudios geofísicos la parte más profunda se encuentra entre las localidades de Santa María

Magdalena y Corregidora en donde se estima la cima del basamento fracturado a más de 600 metros de profundidad.

Las márgenes del graben se presentan asimétricas, observándose más escarpadas hacia la parte oriental donde se observa un ángulo en el hechado de la falla Querétaro entre los 10° y 15° hacia la parte occidental. En la parte poniente, el escarpe de esta margen es menos visible, con excepción de algunos lugares (falla el Tlacote). El piso del graben ha sido afectado por disturbios volcánicos posteriores a la dislocación, los cuales se detectan en manifestaciones parcialmente cubiertas por sedimentos volcanolacustres y aluviales (Cerro del Tambor, el Cerro de Las Campanas, etc.).

Falla Querétaro

La falla Querétaro es de tipo normal y tiene una longitud de 61 km; Alaniz Álvarez et al. (2001) la dividen en tres sectores:

La traza de la falla Querétaro-norte es evidenciada por el límite poniente del alto topográfico entre San José Iturbide y Santa Rosa de Jáuregui. El escarpe tiene una orientación N-S y se extiende por más de 10 km, poniendo en contacto ignimbritas riolíticas de 29.3 Ma y basaltos del Mioceno medio, con depósitos sedimentarios pertenecientes a la unidad de Arenisca y Conglomerado cenozoico. Al norte de San José Iturbide, la traza de la falla se proyecta hacia una planicie de relleno aluvial, por lo que no se descarta la posibilidad que la estructura continúe sepultada por sedimentos jóvenes. La actividad de este sector debió ser posterior al Mioceno medio, que es la edad de los basaltos desplazados, y anterior a la actividad de los sectores central y meridional, ya que este escarpe está considerablemente más erosionado.

El sector central de la falla Querétaro, con 15 km de largo, no muestra un escarpe bien desarrollado, aunque en su extremo meridional produjo un desplazamiento vertical de 50 m en lavas del volcán Santa Cruz. Desde el norte de El Salitre, hasta Santa Rosa de Jáuregui, la falla es sugerida por la alineación de fuentes de emisión volcánica del Basalto Querétaro

y de la Dacita Obrajuelo y desniveles topográficos menores, sin que se observe un escarpe de falla.

La falla Querétaro-sur, con traza de 25.5 km de largo, muestra una orientación N22°W y ángulo alto. Esta falla corta a los Basaltos Querétaro y expone al Volcaniclástico Querétaro a lo largo de su escarpe. La roca más joven desplazada por esta falla corresponde a las lavas del volcán Cimatorio. El desplazamiento vertical promedio es de 80 m. La falla Querétaro-sur está cortada por fallas con dirección ENE. Esta relación se evidencia por el truncamiento que presenta el escarpe N-S en el costado este del volcán Cimatorio. En ese lugar hay además un alineamiento de centros de emisión con dirección ENE. La falla Querétaro termina en la falla Huimilpan (fuera de nuestra área de estudio) de rumbo N80°E cuyo escarpe se observa con un grado de erosión mínimo.

Se concluye que la falla Querétaro es una falla de tipo normal, con un desplazamiento máximo de 80 m observado en el sector sur. La actividad a lo largo de la falla ocurrió en tiempos diferentes, presentándose la más antigua en el sector norte, presumiblemente entre los 10 y 7 Ma, y la más joven hacia el sur, donde tuvo actividad en el Mioceno tardío, posterior a los 5.3 Ma.

Falla 5 de Febrero

La falla 5 de Febrero es de tipo normal, tiene 14 km de largo, una dirección N-S y se le calculó un desplazamiento vertical de 100 m. Esta falla corta a los derrames de basalto Querétaro fechado en 7.5 Ma. La falla 5 de Febrero se ubica 5 km al poniente del sector central de la falla de Querétaro (Alaniz-Álvarez et al., 2001).

Falla Tlacote

De acuerdo con Alaniz-Álvarez et al., 2001 esta falla también es de tipo normal, su escarpe se observa por más de 20 km. Está constituida por dos segmentos con orientación ENE-

WSW, cuya expresión topográfica y relaciones de corte indican que es anterior a la falla Tlacote.

El desplazamiento vertical fue de 80 m. Tanto en el bloque levantado como en el hundido se encuentra el Basalto Querétaro. La edad de actividad de esta falla es más joven que 7.5 Ma. Sin embargo no se pudo esclarecer inequívocamente si la falla termina al sur de los derrames del Dique El Patol de 6.2 Ma (ubicado al norte del valle de Obrajuelo fuera de la zona de estudio) o si está sepultada por ellos.

Falla Obrajuelo (Salitre)

Esta falla (Alaniz-Álvarez, et al., 2001 la nombran como Falla San Bartolomé) se extiende desde las inmediaciones de los afloramientos de la Dacita Obrajuelo hasta 27 km al sur; tiene como rasgo distintivo la presencia de manantiales de agua caliente y *geisers* a lo largo de su traza. La orientación de la falla varía de NNW a N-S y es de tipo normal. El escarpe tiene cerca de 100 m de altura en el sector norte y 50 m en el segmento sur. Estos dos sectores están separados por la falla Central, la cual tiene rumbo ENE-SSW. A lo largo del bloque levantado se localiza el Basalto Querétaro, mientras que en el hundido aparecen sedimentos de la Arenisca y Conglomerado cenozoicos. El desplazamiento máximo se calculó superior a 100 m para el sector norte. La edad de la falla se infiere sincrónica con la falla Tlacote y la falla 5 de Febrero, atendiendo al grado de erosión del escarpe y a las unidades estratigráficas que corta.

Falla la Cañada

Se trata de un alineamiento formado en el Plioceno, que corta en forma transversal al graben de Querétaro desde la localidad de la Cañada, y se continua al poniente por la Calera de Obrajuelo y Calera de Ameche en el estado de Guanajuato. De hecho esta falla dio origen al cauce del Río Querétaro.

Falla Menchaca

Se encuentra situada al norte de la falla La Cañada, es de menor extensión pero conserva las mismas características que ésta.

De la misma forma se encuentran una serie de lineamientos secundarios con la misma orientación formando un tren estructural transversal al graben de Querétaro.

Falla Sur

La falla Sur está compuesta por varios segmentos con orientación N70°E y con longitudes de aproximadamente 5 km, estas estructuras cortan al volcán Cimatorio y a la falla Tlacote. El relieve del escarpe que se observa en la falla al sur del volcán Cimatorio es el más pronunciado; en el bloque hundido se depositaron sedimentos lacustres y aluviales y su desplazamiento se estima mayor que 100 m. En el centro del volcán hay una falla con dirección N70°W que desplaza a la falla Querétaro-sur y sobre la traza de una falla subparalela se localizan al menos tres fuentes de emisión, ubicadas hacia el oriente del volcán. Esto sugiere que esta fractura existía previamente y que se reactivó en un tiempo posterior a la formación del volcán Cimatorio y a la falla Querétaro-sur (Alaniz-Álvarez et al., 2001).

Falla Ixtla

Siguiendo a Alaniz-Álvarez, et al., (2001), se denomina aquí falla Ixtla a una estructura con dirección N50°E, que está constituida por varios segmentos de falla con escarpes mal desarrollados y que cortan al Basalto Querétaro. Este conjunto de fallas limitan hacia el sur a la Dacita Obrajuelo, observándose además que las fuentes de emisión de esa unidad volcánica se encuentran alineadas en dirección NE-SW, lo cual sugiere su emplazamiento a lo largo de esta estructura.

En la Hoja Querétaro, los sedimentos mesozoicos afloran solamente en el bloque levantado de la falla Ixtla, observándose también que el Volcanismo Querétaro y los sedimentos aluviales y lacustres se encuentran únicamente en el bloque hundido de esta falla.

2.3 Características hidráulicas del acuífero

La actualización del censo general de captaciones para 1995 realizada por la empresa Guysa (1996), indica la existencia de 494 pozos profundos, de ellos, 216 se encontraban activos, 107 se encontraban inactivos, 49 se tenían registrados como secos, 109 se encontraban tapados, 10 fueron negativos y 3 se encontraban en perforación. Dentro del área a modelar se cuenta también con 90 pozos que corresponden al acuífero de Obrajuelo, estos pozos fueron extraídos de la base de datos proporcionados por la CEAG, de ellos 66 se encuentran actualmente activos y 24 se encuentran inactivos. En la figura 2.9 se presenta la distribución de las captaciones en el área de estudio. La empresa Guysa (1996) manifiesta que la inhabilitación de la mayoría de las captaciones se debe a que han sido superadas por el ritmo de abatimientos del sistema acuífero, a la geología del subsuelo, a la calidad del agua subterránea debido al carácter incrustante y a la construcción de las captaciones ya que en cortos periodos se observan grandes niveles de azolve.

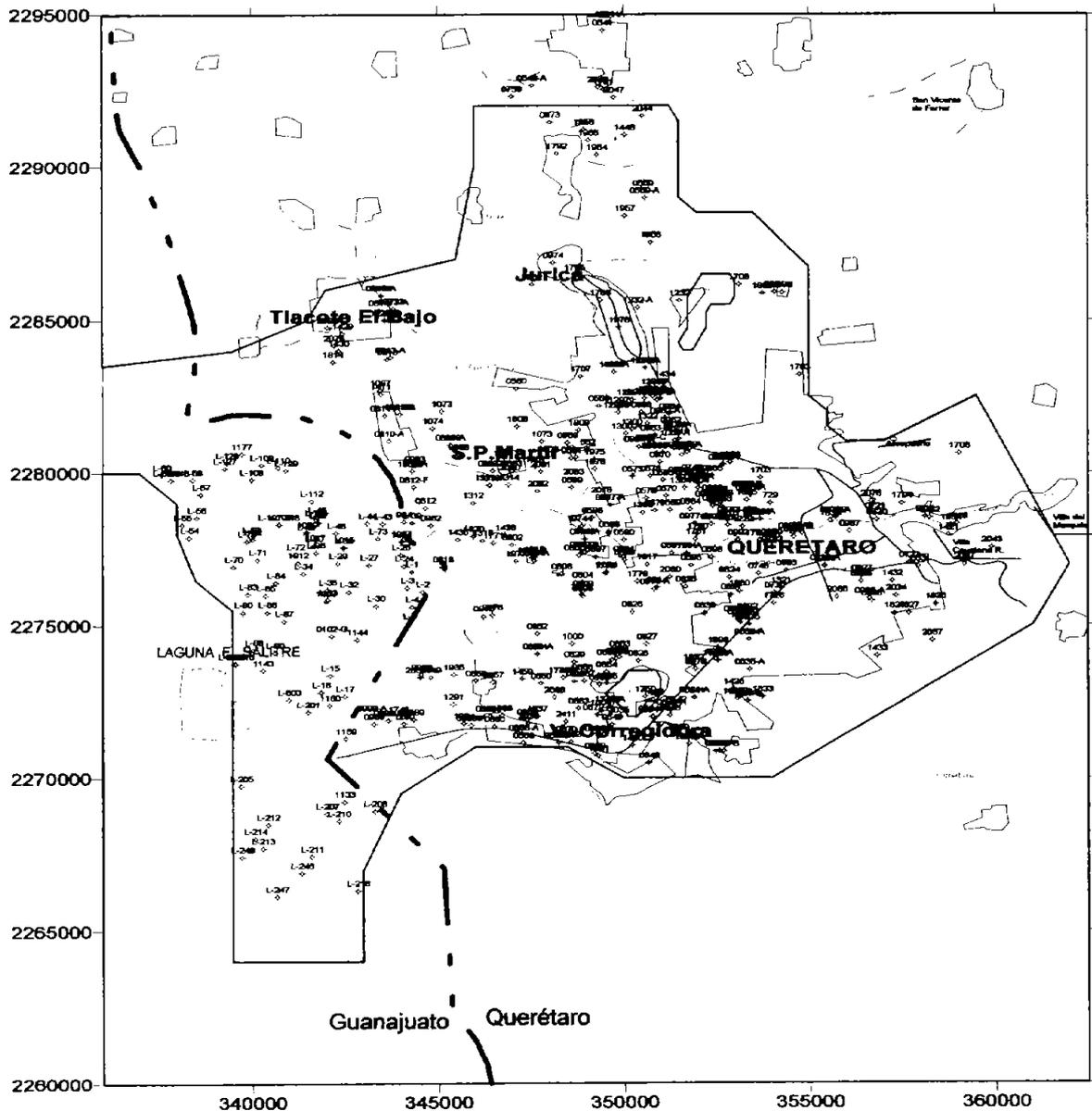


Figura 2.9 Distribución de las captaciones en el área de estudio.

2.3.1 Caracterización hidráulica (Pruebas de bombeo)

Los datos de conductividades hidráulicas para el presente trabajo fueron obtenidos de las reinterpretaciones de pruebas de bombeos realizadas por la empresa Guysa en el año de 1996 y de estudios previos realizados por esa misma empresa. Para la zona de Obrajuelo se tomaron datos del estudio realizado por la empresa Lesser (1995) y del estudio realizado por la empresa Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C. V. (1998).

La empresa Guysa (1996) reinterpreto 18 pruebas de bombeo para los que se contaba con información completa de la prueba. Los métodos de solución aplicados fueron Neuman y Theis para el caso en que las pruebas indicaban la existencia de acuíferos libres, y para el caso de pozos ubicados en zonas con confinamiento local fueron analizadas por el método de Hantush, . Los valores obtenidos son representativos tanto del medio poroso como del fracturado. En la tabla 1 anexo I, se muestran los resultados de la reinterpretación de las pruebas de bombeo.

Los datos de la transmisividad de los pozos L-3 y L-205 se obtuvieron del informe de Lesser (1995) con valores de 164.16 m²/día y 527.04 m²/día respectivamente. Los valores de transmisividad de los pozos L-86 y L-214 se tomaron del informe de Ingeniería Geológica Computarizada (1998) con un valor de 1296 m²/día para ambos pozos. En la figura 2.10 se muestra la ubicación de los pozos con datos de conductividad hidráulica.

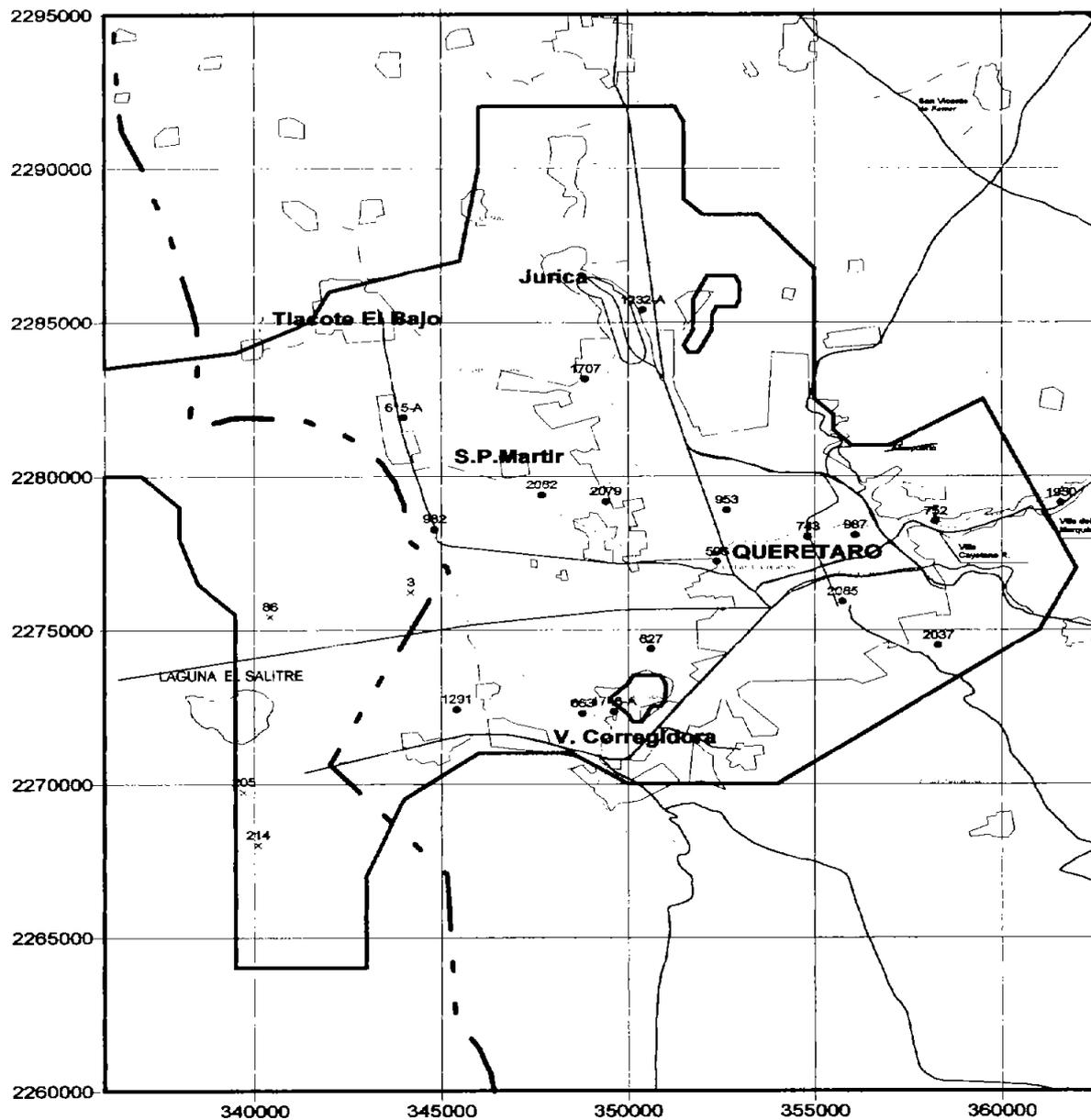


Figura 2.10. Ubicación de los pozos con datos de transmisividad y conductividad hidráulica.

2.3.2 Piezometría.

La piezometría es el principal indicador del flujo. De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación, generan movimiento de aguas subterráneas en dirección a las localidades

donde la elevación de los niveles de saturación es menor, todo esto si no existen fronteras que impidan el paso del agua.

Dentro del valle existen abatimientos importantes debido al bombeo, este fenómeno se puede observar sobre todo en la Zona Industrial Benito Juárez y en Santa María Magdalena, en las que existe una alta densidad de pozos.

De acuerdo con datos de la CEAQ, este valle cuenta con un historial de niveles de agua subterránea; se inicia desde el año de 1970 con 20 pozos piloto monitoreados. Para 1988 ya se contaba 54 y a partir de 1990 se miden sistemáticamente dos veces por año a través de una red de más de 70 captaciones. La tabla 2a del anexo I, contiene la historia de las elevaciones del nivel estático de los pozos censados en el valle de Querétaro de 1970 a 2000. De los datos proporcionados por la CEAG se extrajeron datos del nivel estático de 19 pozos ubicados en el acuífero de Obrajuelo; estos pozos presentan datos de la elevación del nivel estático de octubre de 1995 a octubre de 2001. La tabla 2b anexo I contiene las elevaciones del nivel estático de los pozos ubicados en el acuífero de Obrajuelo. De la revisión de esta base de datos se tomaron los años que presentan mayor información del nivel estático, para realizar planos de la configuración piezométrica del acuífero, éstos son: agosto de 1981, agosto de 1985, agosto de 1990, diciembre de 1993, diciembre de 1995 y diciembre de 1999.

En las figuras 2.11 a la 2.16 se muestran las configuraciones piezométricas para los años 1981, 1985, 1990, 1993, 1995 y 1999 respectivamente, en los que se pueden observar las diferencias en las elevaciones del nivel estático entre un año y otro. Para la realización de dichas configuraciones piezométricas se estimaron datos de las elevaciones del nivel estático de pozos que para algún año se carecía de dato; las estimaciones se hicieron considerando el nivel estático entre un año y otro o asignando una línea de tendencia a los datos con la ayuda del programa Excel. La descripción de las estimaciones se presenta en el anexo III. En la tabla 3 anexo I se tienen las elevaciones del nivel estático medidos y estimados para la construcción de las configuraciones piezométricas.

En todas las configuraciones piezométricas se observan cuatro zonas de recarga y una de descarga del acuífero. Las zonas de recarga están ubicadas al este, en la zona de la cañada; al noroeste, zona próxima a los pozos 1963 y 976 del rancho San Pedrito; al norte, próxima a Jurica; al suroeste, zona de la laguna El Salitre. La zona de descarga se ubica al oeste descargando hacia el acuífero de los Apaseos.

Cabe señalar que en la zona en la que se tiene descarga no se cuenta con datos de piezometría, por lo que las configuraciones en esa zona son resultado de una interpretación hidrogeológica. Por otro lado en esta zona no se tienen registrados pozos de extracción, además de que se encuentra en una zona de elevaciones topográficas en forma de lomeríos, por lo que también es posible que exista una zona impermeable.

Configuración piezométrica para agosto de 1981.

En la configuración piezométrica para agosto de 1981 se observan las siguientes elevaciones de los niveles piezométricos en las fronteras de recarga y descarga: al Este, 1840 m.s.n.m.; al Noreste, 1870 m.s.n.m.; al Norte, 1900 m.s.n.m.; al Suroeste, 1850 m.s.n.m.; y al Oeste, 1740 m.s.n.m.. Dentro del área de estudio se observan tres conos de abatimientos, el primero ubicado en el centro de la ciudad de Querétaro presentando una elevación piezométrica mínima de 1720 m.s.n.m., el segundo ubicado en la zona industrial y San Pedro Mártir con una elevación piezométrica mínima de 1730 m.s.n.m. y el tercero ubicada en la zona del límite con el estado de Guanajuato con una elevación piezométrica mínima de 1740 m.s.n.m.. Se puede apreciar cómo las líneas de corriente tienden a dirigirse a estos conos de abatimiento. En la figura 2.11 se observa la configuración piezométrica y las direcciones del flujo para agosto de 1981.

Configuración piezométrica para agosto de 1985.

En la configuración piezométrica para agosto de 1985 se observan las siguientes elevaciones de los niveles piezométricas en las fronteras de recarga y descarga: al Este, 1820 m.s.n.m.; al Noreste, 1870 m.s.n.m.; al Norte, 1890 m.s.n.m.; al Suroeste, 1840

m.s.n.m.; y al Oeste, 1730 m.s.n.m.. Se observa la formación de tres conos de abatimiento, el primero en el centro de la ciudad de Querétaro con una elevación piezométrica mínima de 1710 m.s.n.m., el segundo en la zona industria y San Pedro Mártir con una elevación piezométrica mínima de 1720 m.s.n.m. y el tercero en los límites con el estado de Guanajuato con elevación mínima de 1730 m.s.n.m.. Se observa que la dirección del flujo va de las zonas de recarga hacia los conos de abatimiento. En la figura 2.12 se observa la configuración piezométrica y las direcciones del flujo para agosto de 1985.

Configuración piezométrica para agosto de 1990.

Para esta configuración piezométrica se observan las siguientes elevaciones piezométricas: al Este, 1810 m.s.n.m.; al Noreste, 1870 m.s.n.m.; al Norte, 1890 m.s.n.m.; al Suroeste, 1830 m.s.n.m.; y al Oeste, 1720 m.s.n.m.. Se observa la formación de tres conos de abatimiento, el primero ubicado en el centro de la ciudad de Querétaro con una elevación piezométrica mínima de 1680 m.s.n.m., el segundo ubicado en la zona de San Pedro Mártir con una elevación mínima de 1700 m.s.n.m. y el tercero en los límites con el estado de Guanajuato con una elevación piezométrica de 1710 m.s.n.m.. Las líneas de corriente indican que las direcciones del flujo van de las zonas de recarga hacia los conos de abatimiento. En la figura 2.13 se observa la configuración piezométrica y las direcciones del flujo para agosto de 1990.

Configuración piezométrica para diciembre de 1993.

Para la configuración piezométrica de diciembre de 1993, se observan las siguientes elevaciones: al Este, 1810 m.s.n.m.; al Noreste, 1870 m.s.n.m.; al Norte, 1880 m.s.n.m.; al Suroeste, 1830 m.s.n.m.; y al Oeste, 1710 m.s.n.m.. Al igual que los años anteriores se observan tres conos de abatimientos, el primero ubicado en la zona de la ciudad de Querétaro con elevación piezométrica mínima de 1660 m.s.n.m., el segundo ubicado en San Pedro Mártir con una elevación piezométrica mínima de 1680 m.s.n.m. y el tercer cono de abatimiento se ubica en los límites con el estado de Guanajuato con una elevación mínima de 1710 m.s.n.m.. Las líneas de flujo van de las zonas de recarga hacia los conos de

abatimiento. En la figura 2.14 se observa la configuración piezométrica y las direcciones del flujo para diciembre de 1993.

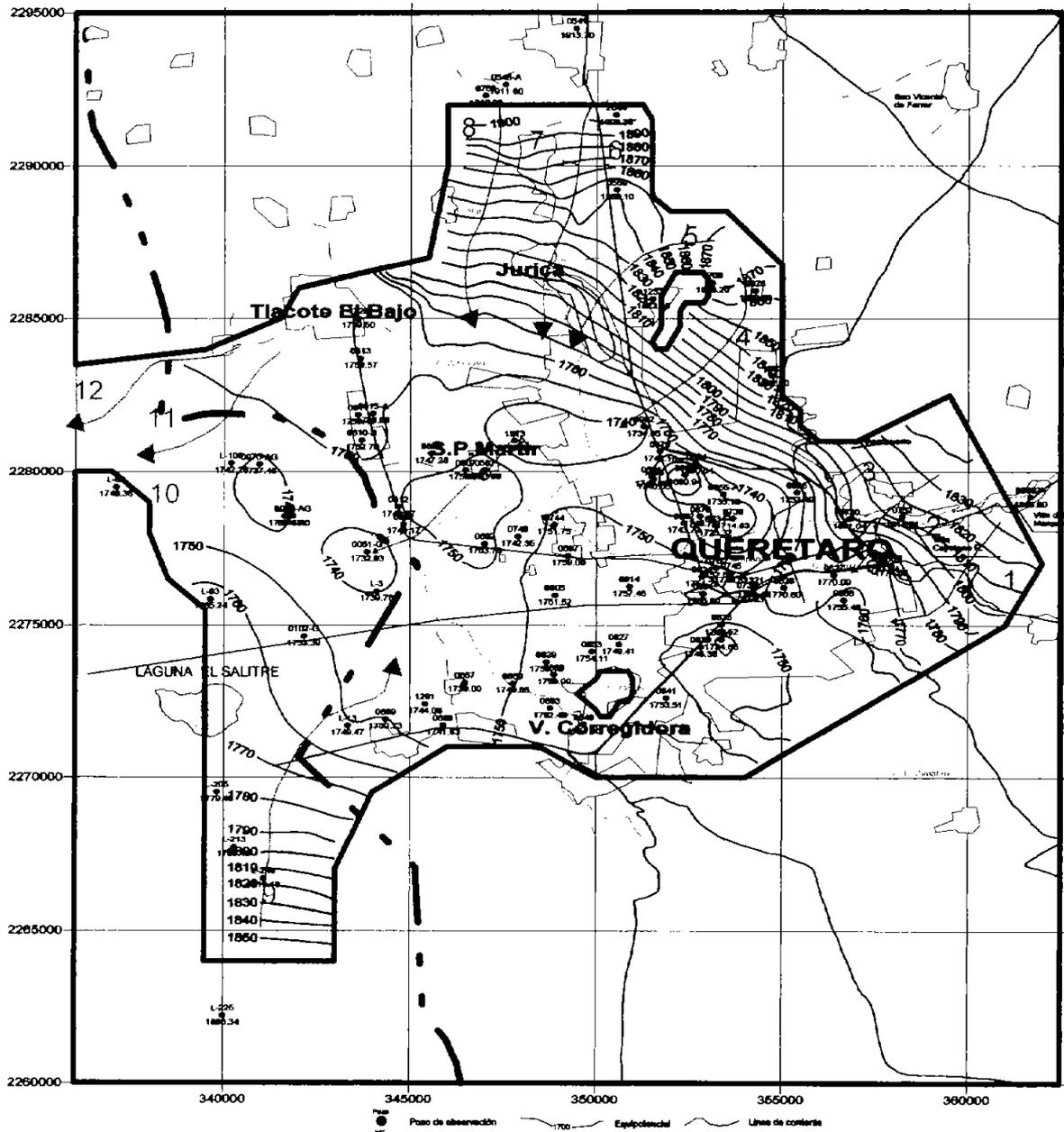


Figura 2.11 Configuración piezométrica para agosto de 1981 (msnm).

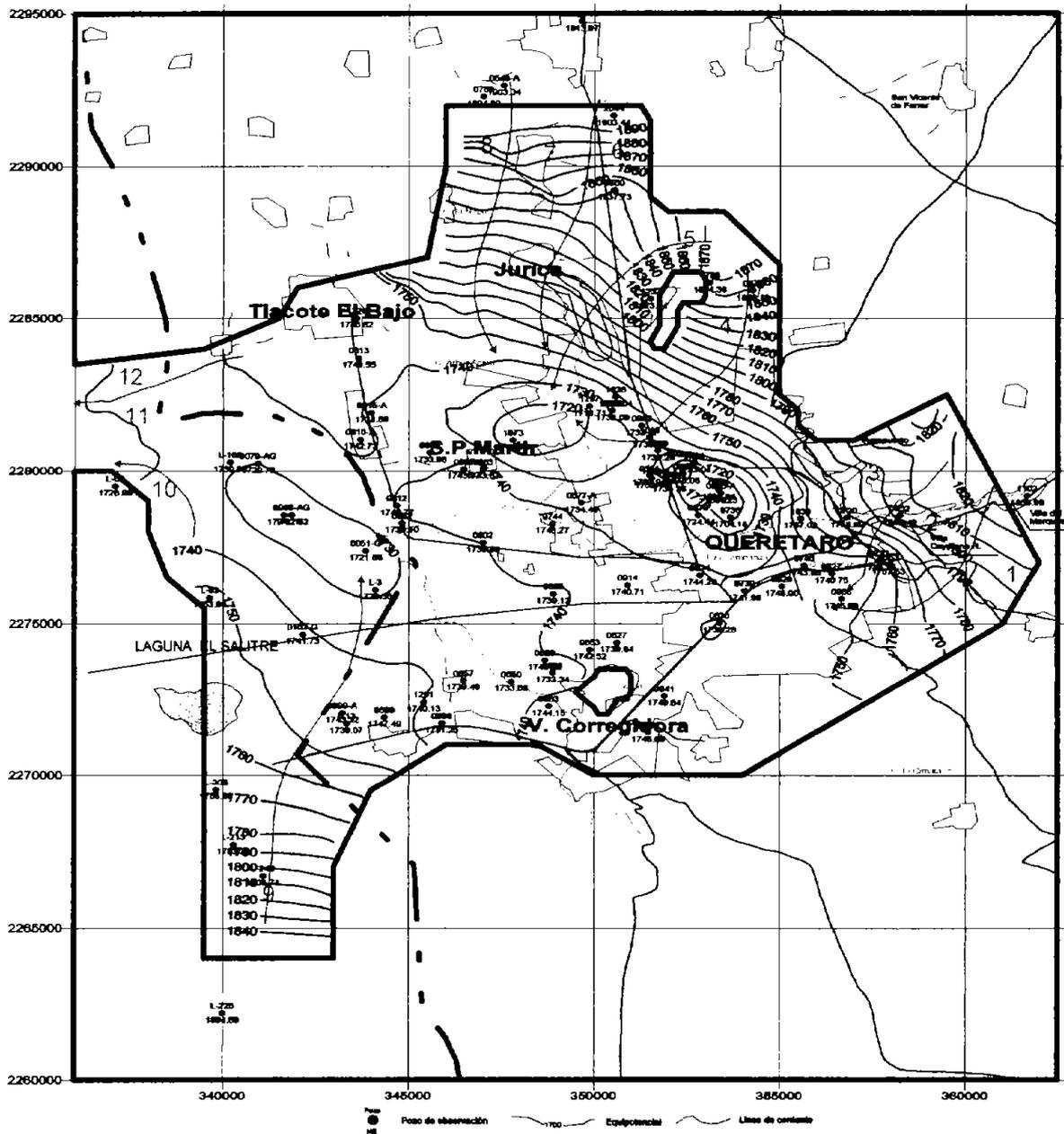


Figura 2.12. Configuración piezométrica para agosto de 1985 (msnm).

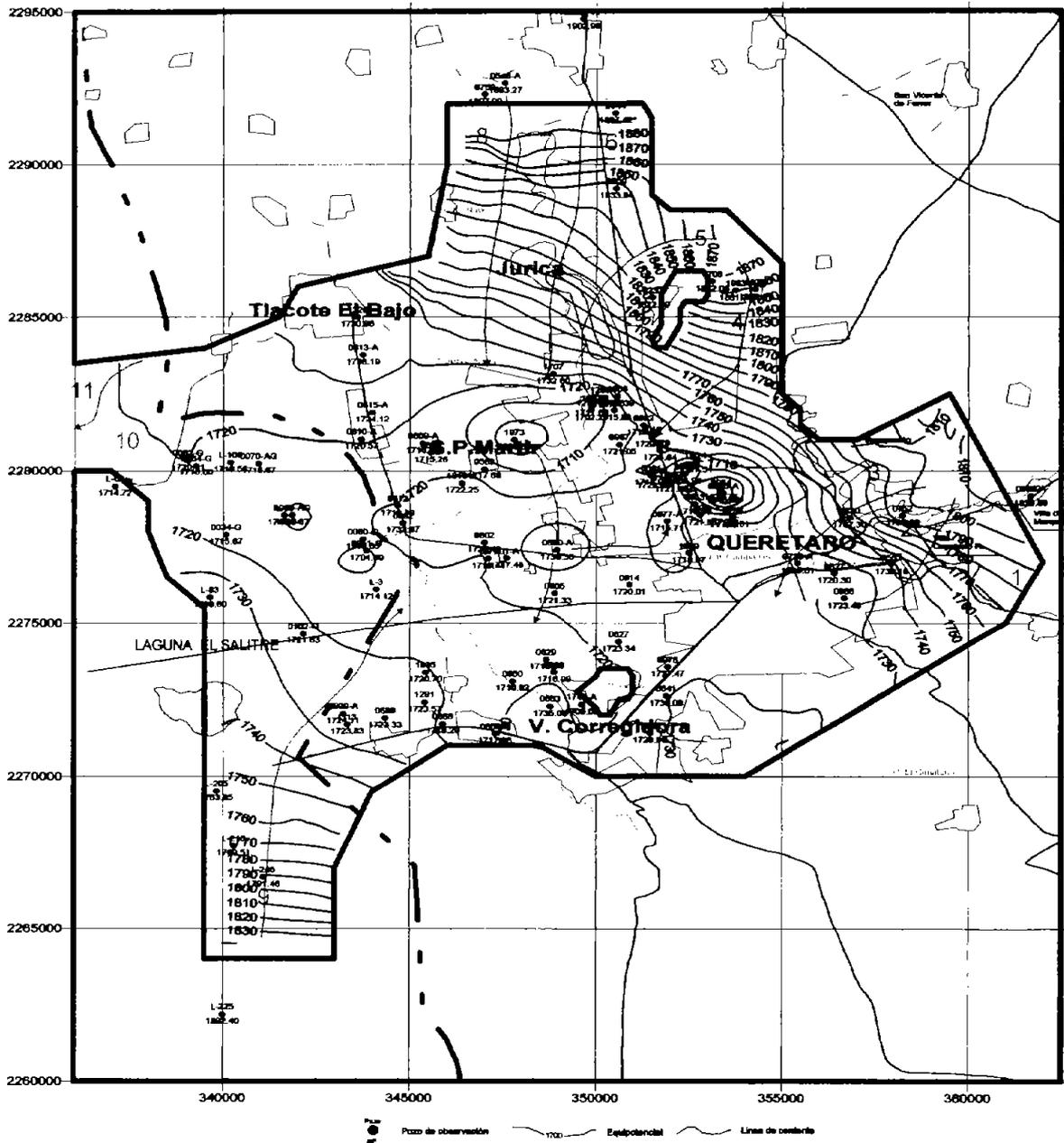


Figura 2.13 Configuración piezométrica para agosto de 1990 (msnm).

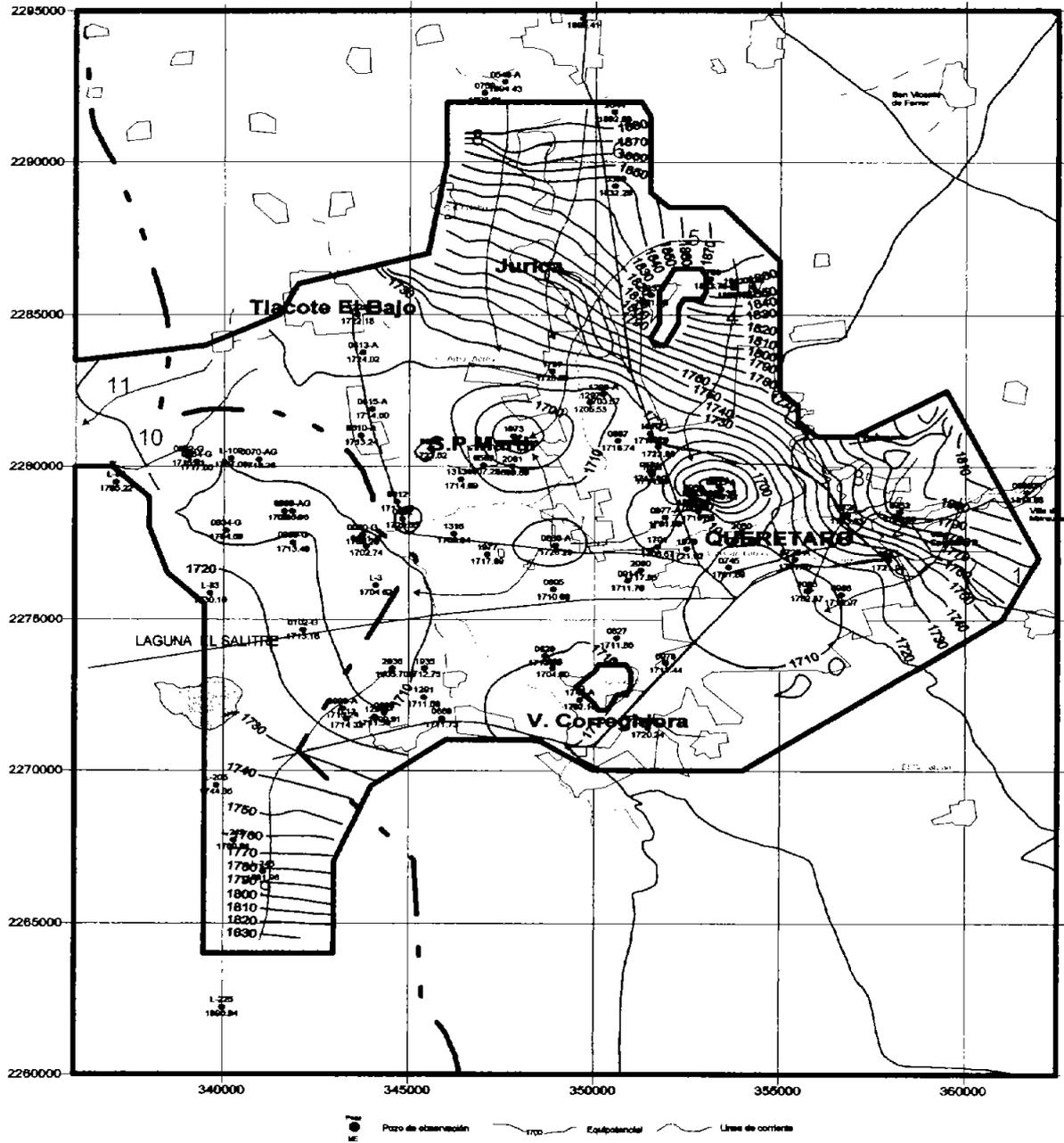


Figura 2.14 Configuración piezométrica para diciembre de 1993 (msnm).

Configuración piezométrica para diciembre de 1995.

Para la configuración piezométrica de 1995 se observan las siguientes elevaciones: al Este, 1800 m.s.n.m.; al Noreste, 1870 m.s.n.m.; al Norte, 1880 m.s.n.m.; al Suroeste, 1820 m.s.n.m.; y al Oeste, 1700 m.s.n.m.. Dentro del área de estudio se observan dos conos de abatimiento, el primero ubicado en la parte central de la ciudad de Querétaro con elevación piezométrica mínima de 1650 m.s.n.m. y el segundo ubicado en la zona de San Pedro Mártir con una elevación piezométrica mínima de 1670 m.s.n.m.. En general en la mayor parte del valle se observan elevaciones piezométricas entre los 1700 y 1710 m.s.n.m.. La dirección del flujo va de las zonas de recarga hacia los conos de abatimiento. En la figura 2.15 se observa la configuración piezométrica y las direcciones del flujo para diciembre de 1995.

Configuración piezométrica para diciembre de 1999.

En la configuración piezométrica de 1999 se observan las siguientes elevaciones: al Este, 1790 m.s.n.m.; al Noreste, 1870 m.s.n.m.; al Norte, 1880 m.s.n.m.; al Suroeste, 1820, m.s.n.m.; y al Oeste 1690 m.s.n.m.. Dentro del área de estudio se observan dos conos de abatimientos, el primero ubicado en la parte central de la ciudad de Querétaro con una elevación piezométrica mínima de 1650 m.s.n.m., y el segundo en la zona de San Pedro Mártir con una elevación piezométrica mínima de 1660 m.s.n.m.. En general en el resto del valle se observan elevaciones piezométricas que van de los 1690 a los 1700 m.s.n.m.. La dirección del flujo va de las zonas de recarga hacia los conos de abatimiento. En la figura 2.16 se observa la configuración piezométrica y las direcciones del flujo para diciembre de 1999.

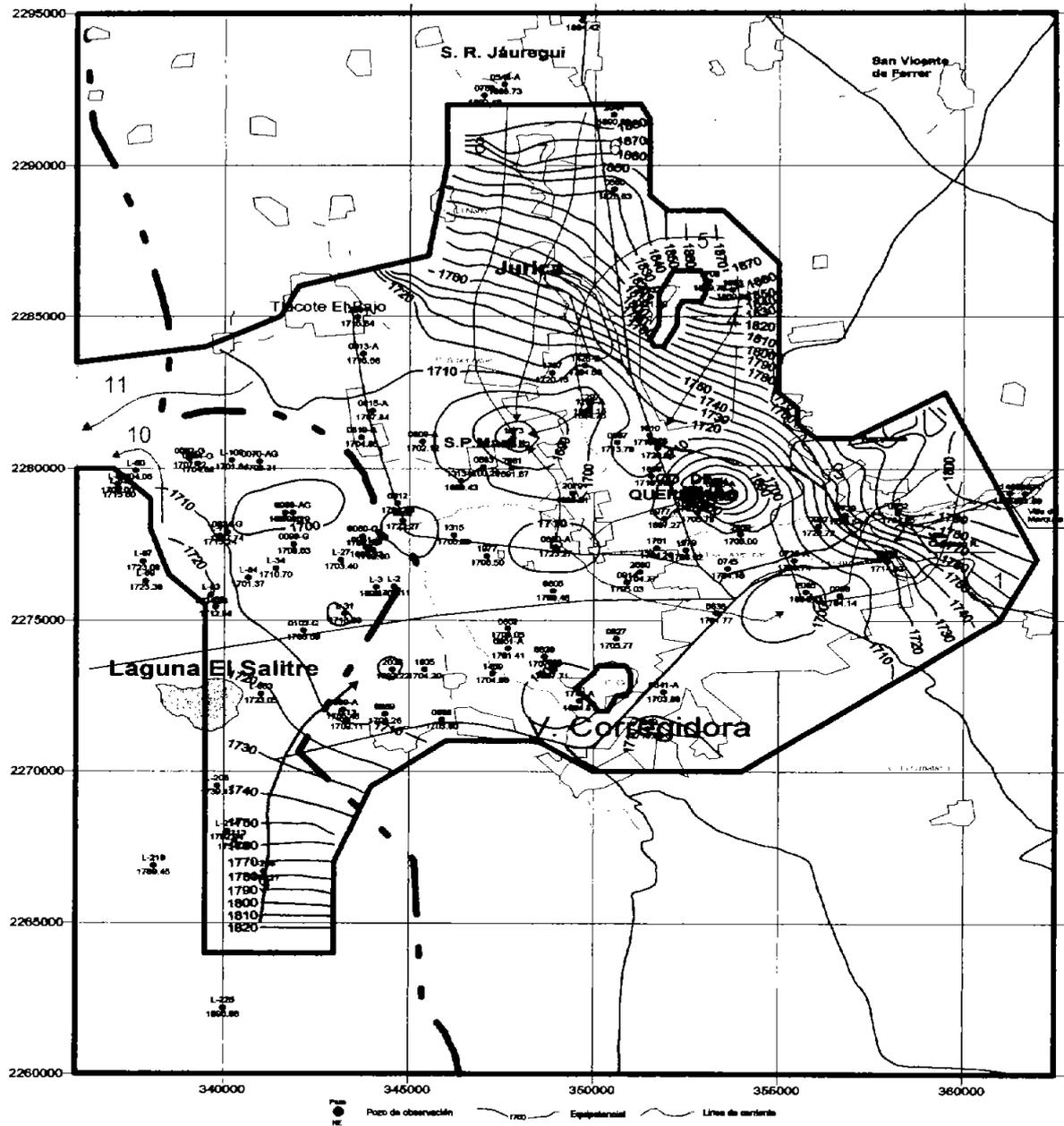


Figura 2.15. Configuración piezométrica para diciembre de 1995 (msnm).

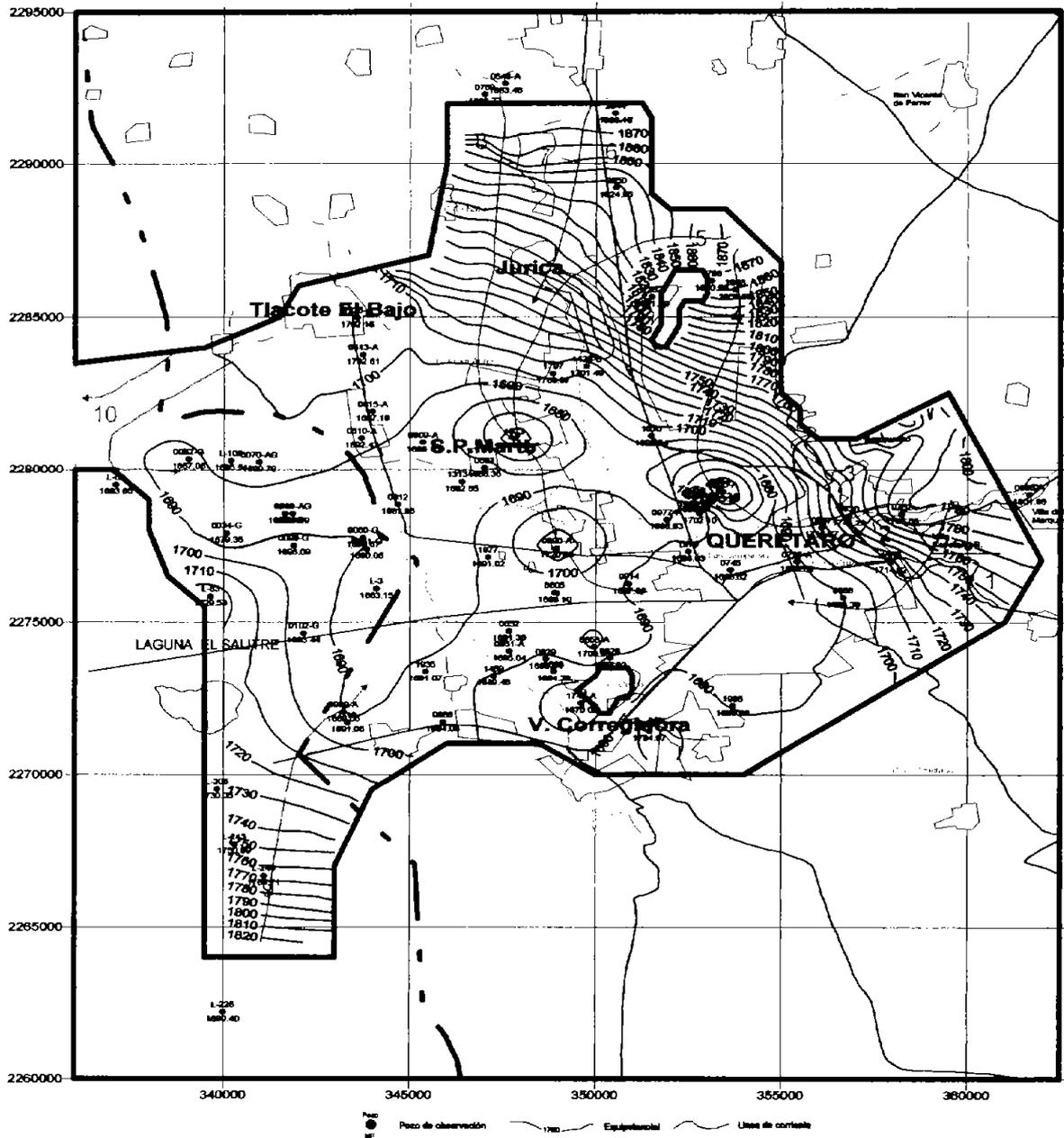


Figura 2.16. Configuración piezométrica para diciembre de 1999 (msnm).

2.3.3 Evolución del nivel estático

Configuración de la evolución del nivel estático para el periodo agosto 81 – agosto 85.

Para el periodo de agosto 81 – agosto 85, se observa en el centro de la ciudad de Querétaro un abatimiento de hasta 30 m, en general en toda el área de estudio se observan abatimientos que van de los 5 a los 15 m y en la parte norte se tienen los abatimientos más pequeños. En la figura 2.17 se presenta la evolución del nivel estático para el periodo agosto 81 – agosto 85.

Configuración de la evolución del nivel estático para el periodo agosto 85 – agosto 90.

Para el periodo de agosto 85 – agosto 90, se presenta un abatimiento de 25 m en el centro de la ciudad de Querétaro, en Villa Corregidora y San Pedro Mártir, se observan abatimientos de 20 m, en el resto del área de estudio los abatimientos van de los 5 a los 15 m. En la figura 2.18 se presenta la evolución del nivel estático para el periodo agosto 85 – agosto 90.

Configuración de la evolución del nivel estático para el periodo agosto 90 – diciembre 93.

Para el periodo de agosto 90 – diciembre 93, se observan dos abatimientos de 20 m, ubicados en la parte central de la ciudad de Querétaro, se observa otro abatimiento de 20 m en la zona de Villa Corregidora y en el resto del valle se tienen abatimientos que van de 5 a 10 m. En la figura 2.19 se presenta la evolución del nivel estático para el periodo agosto 90 – diciembre 93.

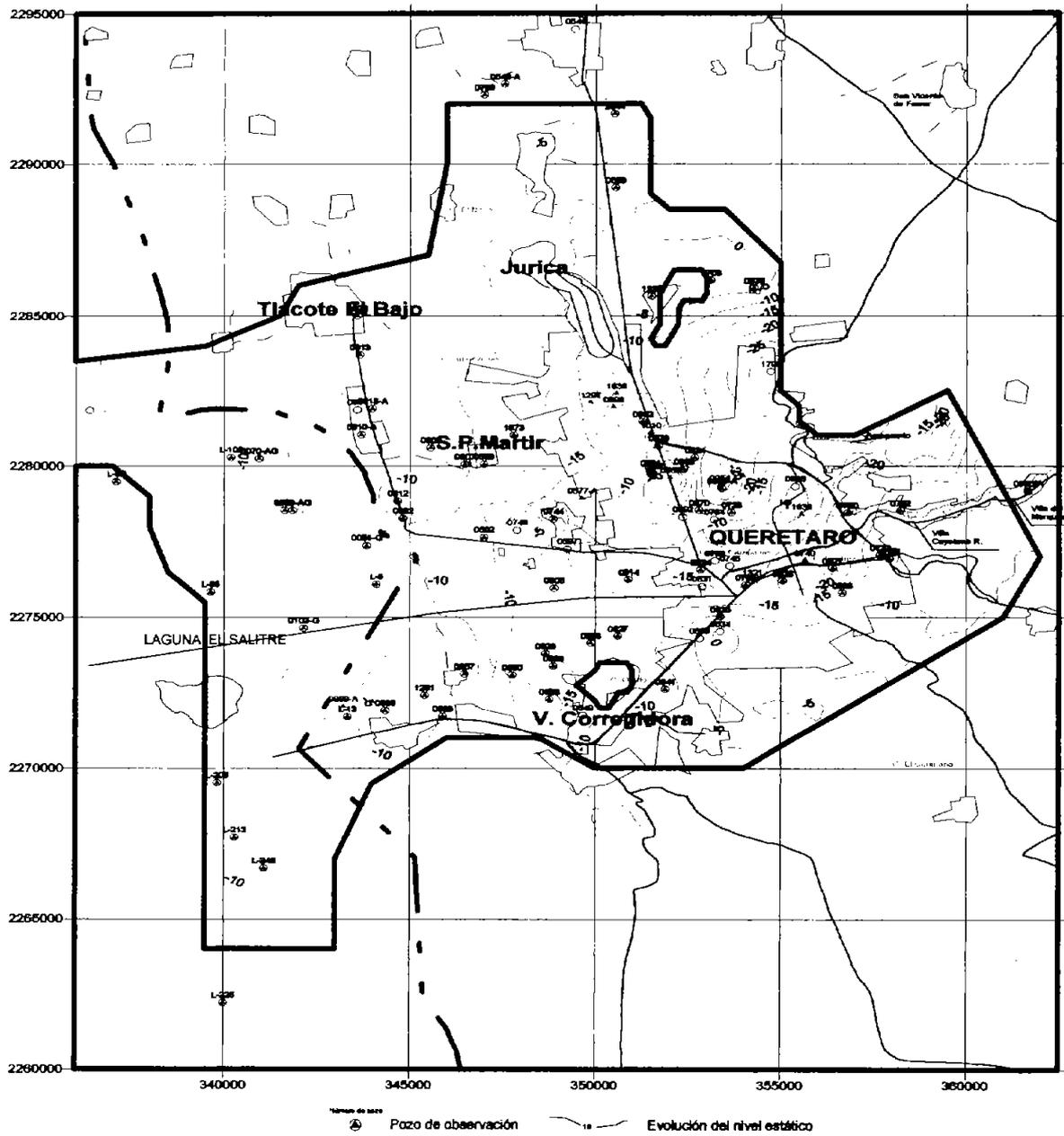


Figura 2.17 Configuración de la evolución piezométrica 81-85 (m).

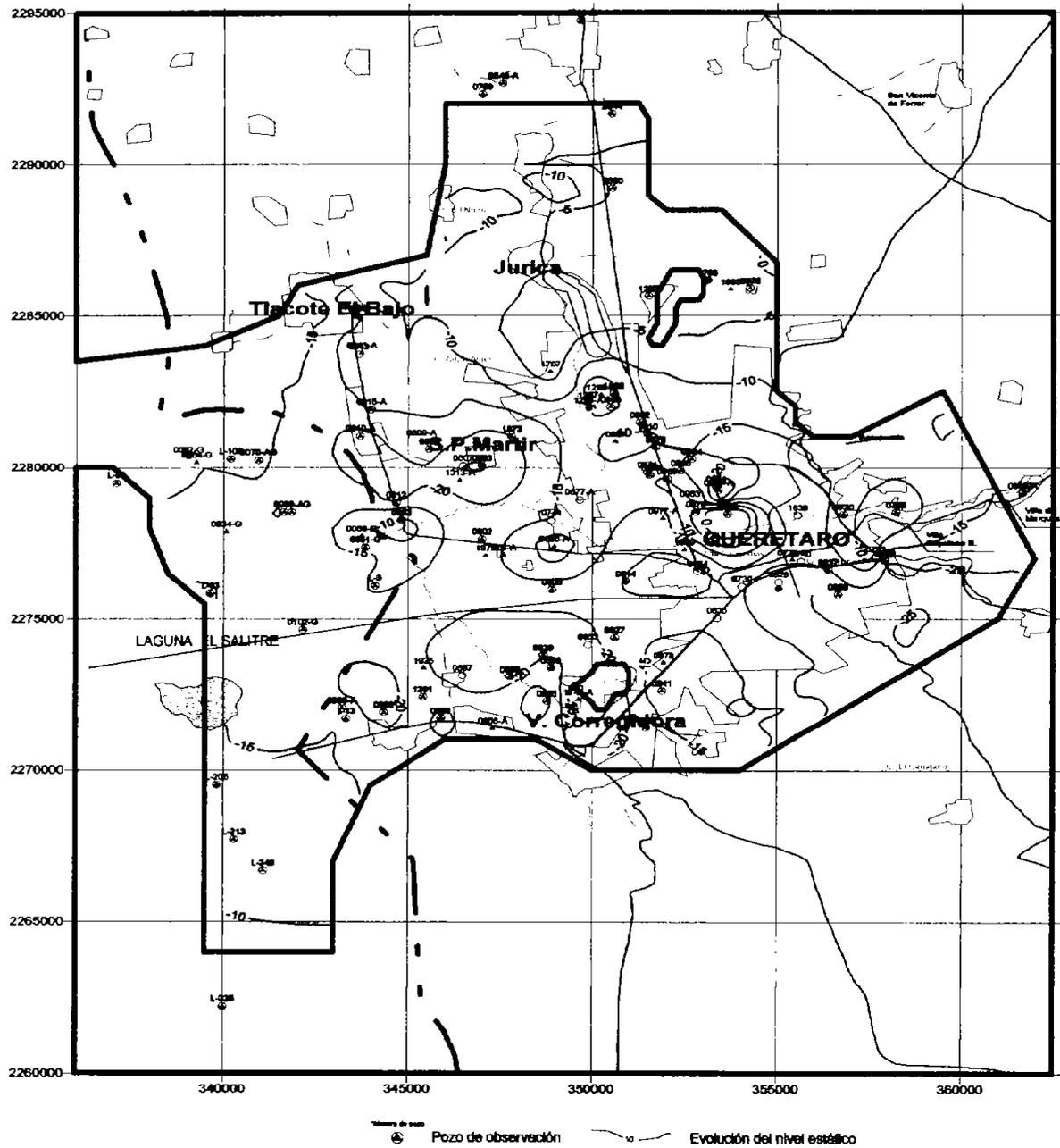


Figura 2.18 Configuración de la evolución piezométrica 85-90 (m).

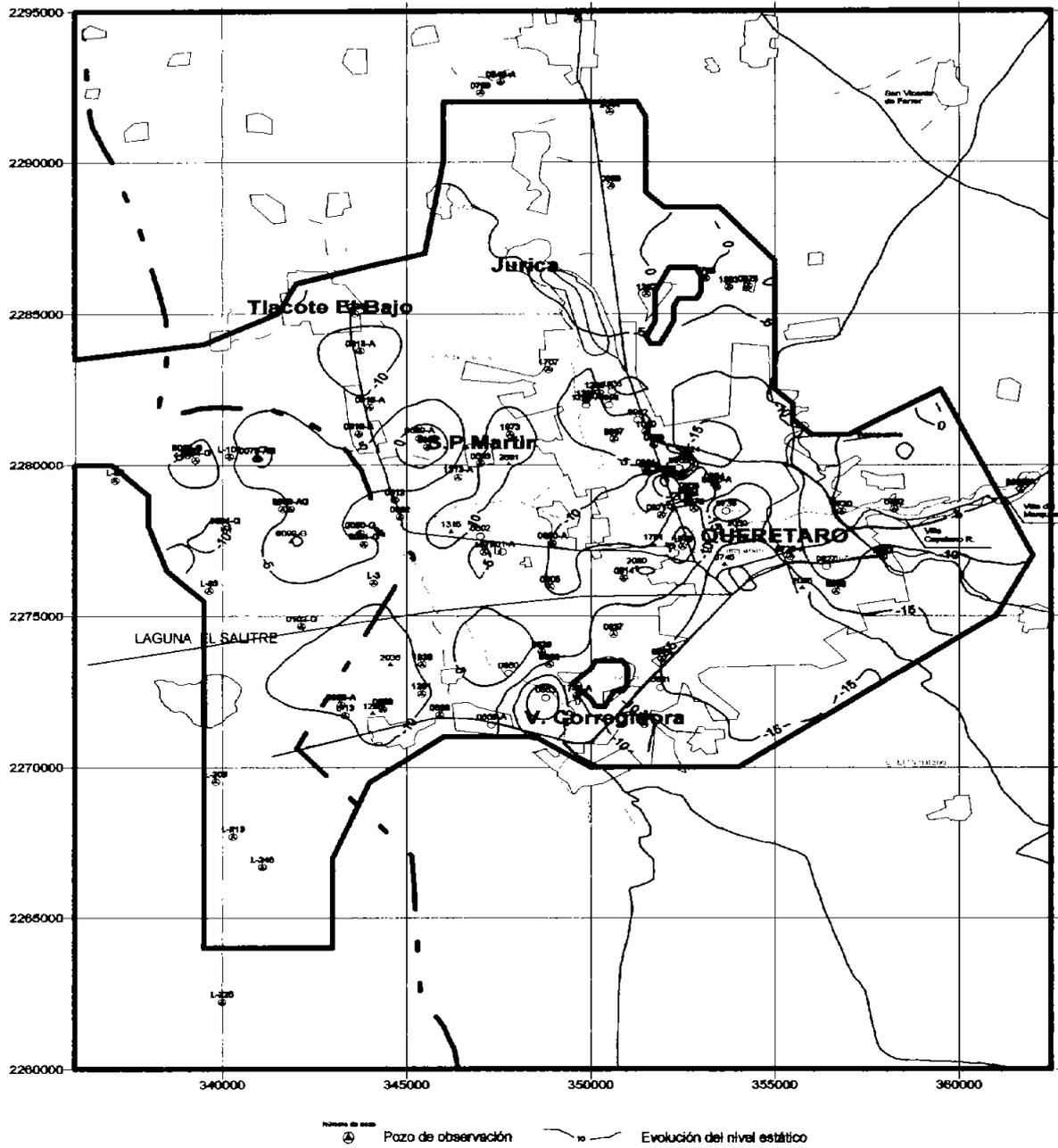


Figura 2.19 Configuración de la evolución piezométrica 90-93 (m).

Configuración de la evolución del nivel estático para el periodo diciembre 93 – diciembre 95.

Para el periodo de diciembre de 1993 – diciembre de 1995, se observan abatimientos de 20 m en la parte norte de la ciudad de Querétaro y en San Pedro Mártir, y se observan abatimientos que van de los 5 a los 10 m en la mayor parte del área de estudio. En la figura 2.20 se presenta la evolución del nivel estático para el periodo diciembre 93 – diciembre 95.

Configuración de la evolución del nivel estático para el periodo diciembre 95 – diciembre 99

Para el periodo de diciembre de 1995 – diciembre de 1999, se observan abatimientos de 30 m en la zona de la ciudad de Querétaro y en la parte oeste en los límites con el estado de Guanajuato; abatimientos de 25 m en la frontera oeste en la zona de Obrajuelo; abatimientos de 15 a 20 m, en la parte sur, en la zona de Villa Corregidora y en general se observan abatimientos de 10 m, en toda el área de estudio. En la figura 2.21 se presenta la evolución del nivel estático para el periodo diciembre 95 – diciembre 99.

Configuración de la evolución del nivel estático para el periodo agosto 81 – diciembre 99

Para estimar el abatimiento que tiene el acuífero en todos los periodos de análisis se realizó la evolución que tiene el nivel estático para el periodo agosto 81 – diciembre 99. Se observa que el abatimiento más importante es de 95 m y se encuentra ubicado en la parte central de la ciudad de Querétaro, le sigue otro abatimiento de 80 m ubicado al sur de la ciudad de Querétaro y en la proximidad del Cerro Gordo en Villa Corregidora. En la zona de San Pedro Mártir se observa otro abatimiento de 75 m. Los abatimientos más pequeños se tienen en la zona norte del área de estudio con abatimientos que van de los 5 a los 10 m. En general dentro del valle de Querétaro se observan abatimientos que van de los 50 a los 60 m en todo el periodo. En la figura 2.22 se presenta la evolución del nivel estático para el periodo agosto 81 – diciembre 99.

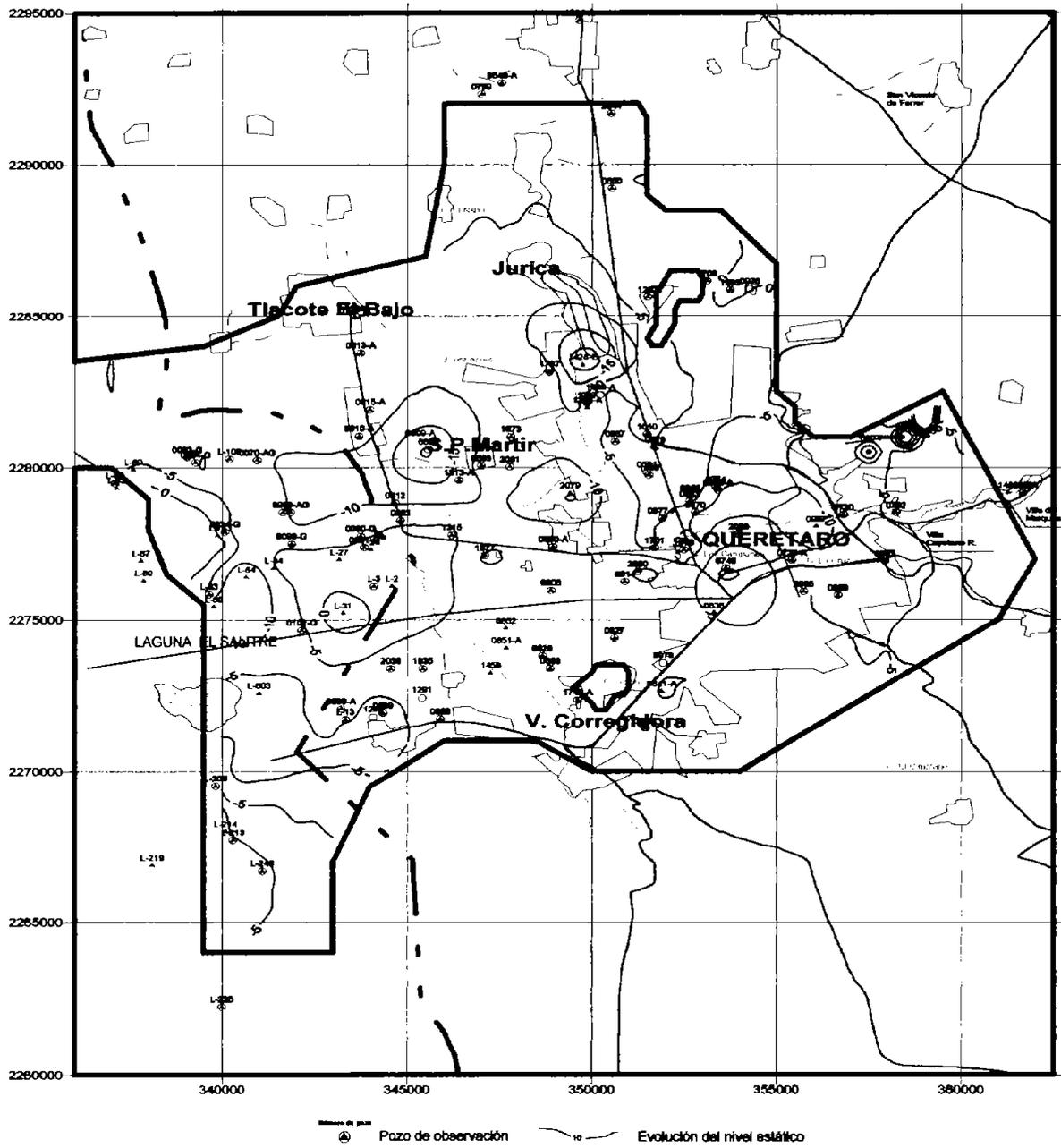


Figura 2.20 Configuración de la evolución piezométrica 93-95 (m).

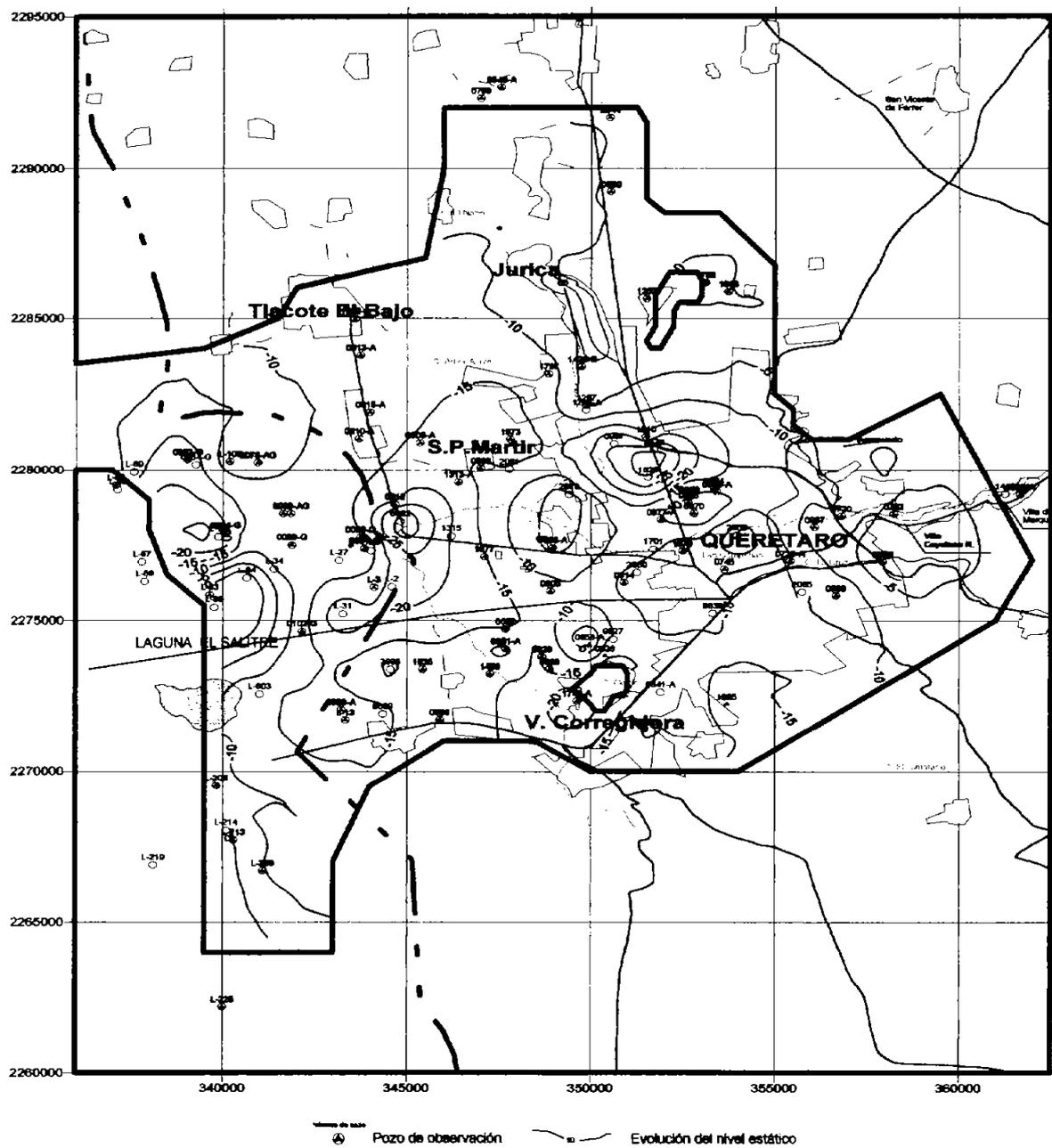


Figura 2.21 Configuración de la evolución piezométrica 95-99 (m).

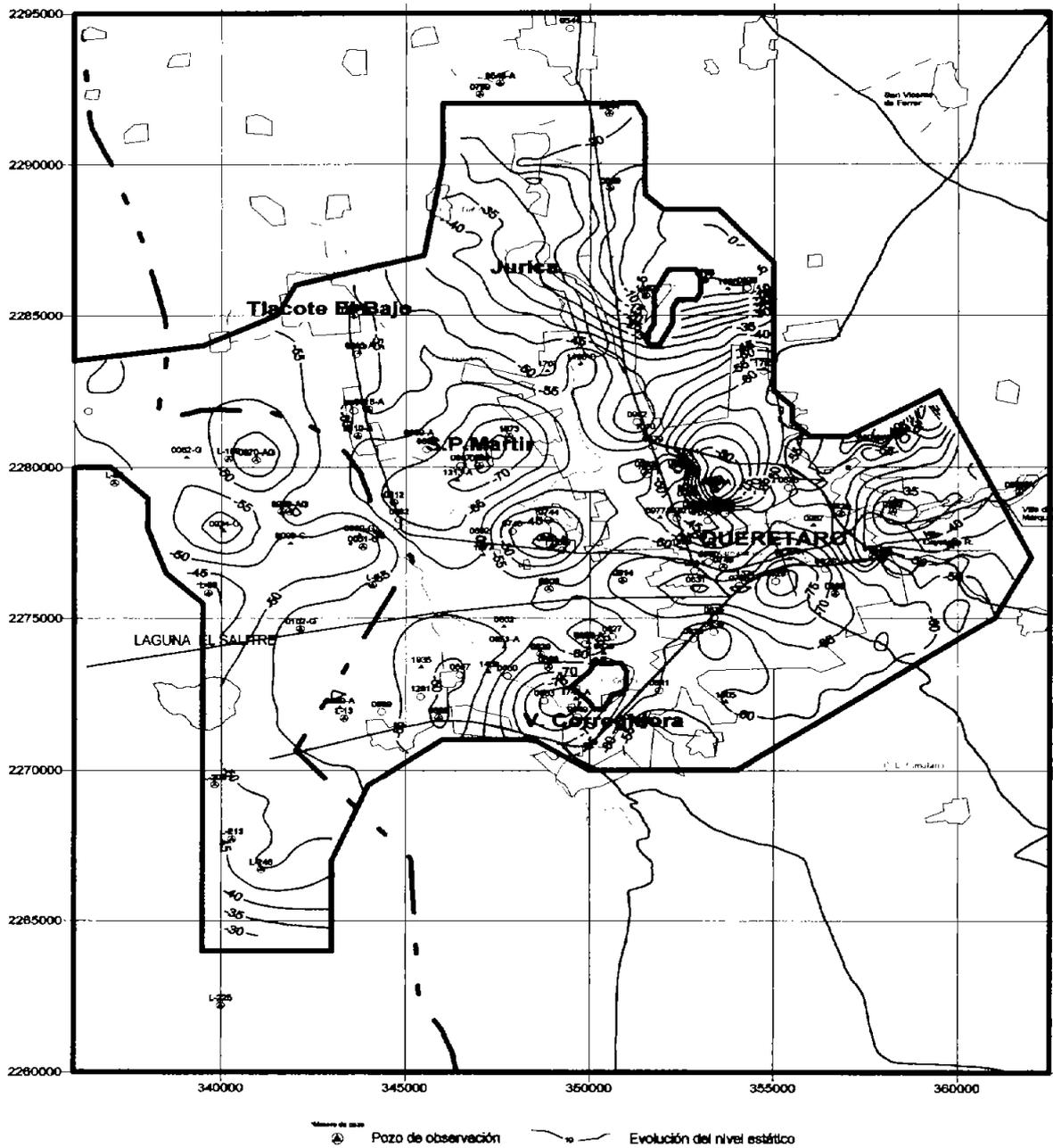


Figura 2.22 Configuración de la evolución piezométrica 81-99 (m).

2.3.4 Temperatura del agua subterránea

De acuerdo con datos de temperatura de agua subterránea de 85 pozos del acuífero del valle de Querétaro medidos en el año 2000 (CEA-UAQ, 2002 y Lesser 2000) la temperatura varía en un rango de 22.6 °C a 35 °C. En la figura 2.23 se observa la distribución de la temperatura del agua subterránea.

Las temperaturas más bajas se observan principalmente en el centro del valle, que van de los 22.6°C a los 29 °C. Las temperaturas de 30° C a 35° C se observan principalmente en las zonas sureste y noroeste del área de estudio.

Se tienen datos de temperaturas de los pozos Menchaca (S/N) y L-206 de 42.5 y 47.1 respectivamente, este comportamiento es muy local y no se incluyen en la configuración de la temperatura mostrada en la figura 2.23.

En la zona de estudio se tienen localizadas dos zonas con registros que indican la presencia de termalismo con temperaturas por arriba de los 90° C. Estas zonas se ubican en las localidades de San Bartolo y la laguna El Salitre; ambas alineadas con la falla Obrajuelo. En un estudio realizado por Lesser (2000) se indica que la geología predominantemente volcánica, la geohidrología de la zona y la química del agua, sugieren la existencia de dos flujos, uno correspondiente a una recarga local proveniente de la lluvia e infiltrada en los alrededores del valle, la cual alimenta al horizonte acuífero que se explota a través de un gran número de pozos, caracterizada por presentar agua fría y otro perteneciente a un flujo regional con recarga lejana y hasta el momento desconocida, que podría estar circulando a gran profundidad, adquiere temperatura al pasar cerca de un foco geotérmico y asciende hacia la superficie facilitado por la falla de Obrajuelo.

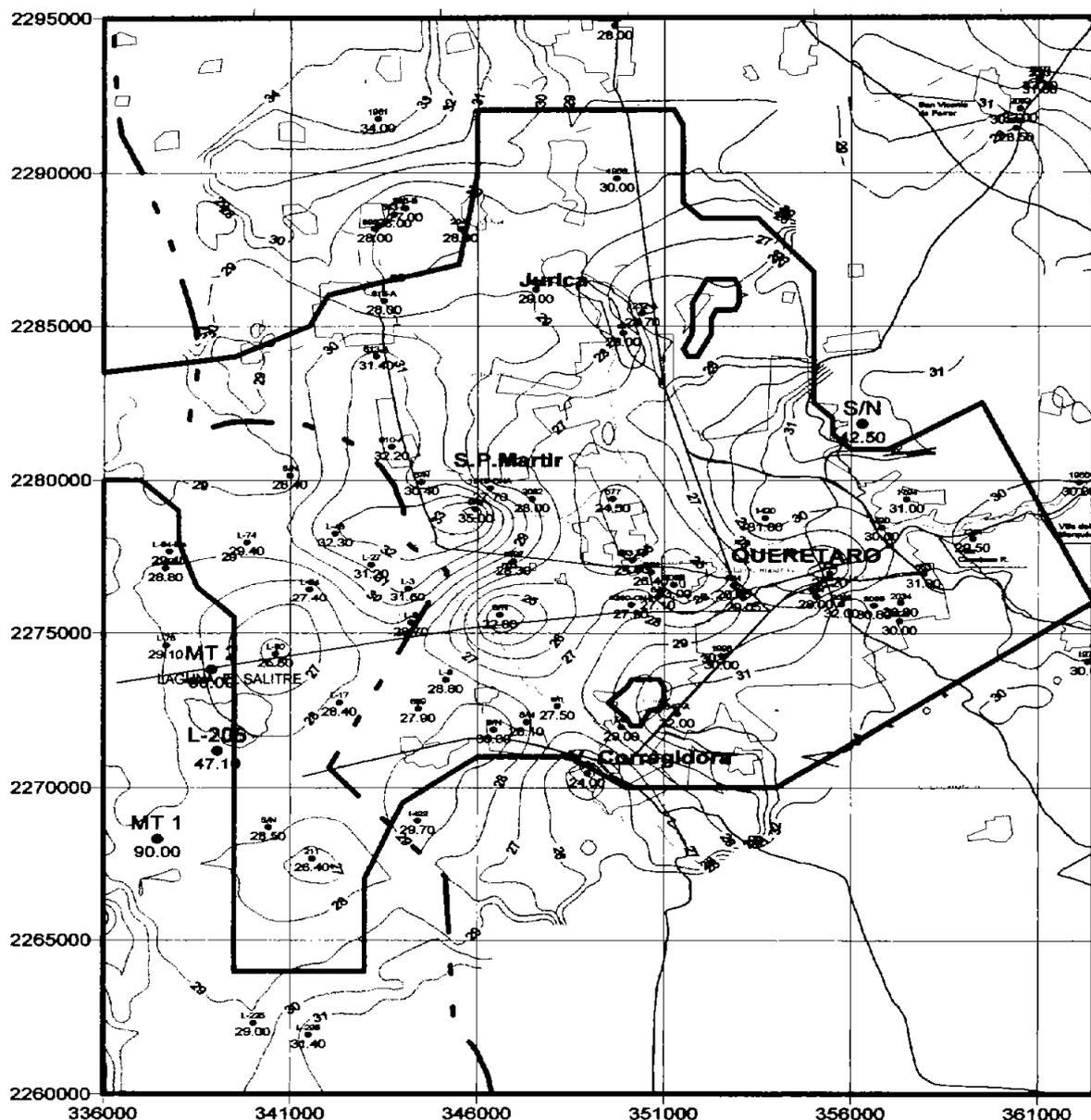


Figura 2.23. Temperatura del agua subterránea (°C).

2.3.5 Extracción de agua subterránea por bombeo.

Como se comentó en la sección 3.3.2, para 1995 existían 216 pozos activos en el acuífero del valle de Querétaro, de estos pozos se extrajeron para 1995 un total de 104.9 Mm³. De este volumen el sector de más consumo es el de agua potable con 61 %, seguido del agrícola con el 29.3 % y el industrial con 8.6 %. El 1.1 % de volumen restante se utiliza para actividades de abrevadero y recreativas.

Para la zona correspondiente al estado de Guanajuato (acuífero de Obrajuelo) de acuerdo con datos proporcionados por la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato, para el año 2000 se tenían dentro del área a modelar 90 pozos de los cuales 66 estaban activos y 24 inactivos, de los pozos activos se extrajeron para ese año un total de 34.4 Mm³. El sector de mayor consumo es el agrícola con 88.9 %, seguido del sector de agua potable con 11.1 %.

Con respecto a la información hidrométrica de los años faltantes se tomó la reconstrucción de bombeo realizada por la empresa Guysa en 1996. Para esta reconstrucción se tomó en cuenta el censo de 1985, que es el más antiguo y que cuenta únicamente con información parcial de datos constructivos y el 50 % de volumen de extracción para ese año. Para 1990 y hasta 1996 la empresa Guysa contaba con censo de pozos, hidrometría y piezometría. De acuerdo con dicha empresa la asignación del bombeo para cada captación fue considerada a partir del gasto conocido para cierto año, con lo que se reconstruyó tomando el mismo caudal y el mismo régimen de operación proyectando hacia años adelante y/o atrás según fuera el caso. A esta reconstrucción, para el presente trabajo se le agregaron los pozos correspondientes al acuífero de Obrajuelo que quedan dentro del área del modelo. Para la reconstrucción del bombeo de estos pozos, de 1981 a 1995 se les asignó el bombeo que se tenía para 1995 y de 1996 a 1999 se asignó el bombeo que se tenía para el año 2000, se tomó en cuenta además la información del año de inicio de operación de cada pozo y el año en que quedaban inactivos según fuera el caso. La asignación de estos volúmenes se hizo debido a que únicamente se contaba con información de bombeo para 1995 y 2000. En la tabla 4 anexo I se presenta la reconstrucción del bombeo tomada de Guysa (1996), complementada con los pozos correspondientes a la zona Obrajuelo.

2.4 Modelo conceptual

El área de estudio comprende al valle de Querétaro e incluye una pequeña porción del estado de Guanajuato, conocida como el acuífero de Obrajuelo. En estudios anteriores no se incluía a la zona de Obrajuelo, por ejemplo, en el modelo de flujo del estudio de Guysa

(1996), los límites del estado de Querétaro con Guanajuato se consideraba una frontera de descarga hacia el acuífero de Obrajuelo. En el presente trabajo se observa en las configuraciones piezométricas mostradas en la sección 3.3.2 que en la zona entre los límites del estado de Querétaro y Guanajuato se tiene la presencia de abatimientos importantes, además de que no es posible definir la presencia de un parteaguas subterráneo que permita separar a ambos acuíferos. Por lo anterior no hay evidencias en esta zona de la existencia de una frontera física o hidráulica que permita estudiar a ambos acuíferos de forma separada. Por otro lado en las mismas configuraciones piezométricas se observa la formación de un parteaguas subterráneo en los límites del acuífero de Obrajuelo con el acuífero de Los Apaseos justo en el lineamiento del río Querétaro, que se consideraba como la descarga original del acuífero hacia Los Apaseos (este mismo parteaguas se presenta en los estudios de Ingeniería Computarizada, 1998 y Lesser, 2000). El área de estudio se extendió hasta esta zona teniéndose al lado norte de Obrajuelo (en donde termina el parteaguas subterráneo) una zona de descarga hacia Los Apaseos.

Las evidencias geológicas y geofísicas indican que el valle de Querétaro se aloja en una gran fosa tectónica limitada por las fallas Querétaro y Obrajuelo de rumbo noroeste-sureste situadas al oriente y poniente respectivamente; a profundidad, el graben se divide en un sistema de fosas escalonadas sepultadas por una potente acumulación de sedimentos vulcanolacustres con derrames intercalados de lavas ácidas y básicas que forman un paquete acuífero de más de 600 metros de espesor.

La parte central de la zona de estudio comprende una planicie en donde se asienta la ciudad de Querétaro con elevaciones del relieve considerables hacia la parte norte y sur del valle.

En la geología superficial se observan las unidades estratigráficas siguientes:

Calizas y lutitas del Cretácico Superior, ubicadas en la zona noroccidental en el poblado Juriquilla.

Andesitas, con afloramientos en toda el área estudiada. Esta unidad se considera como el basamento del acuífero en el presente estudio.

La ignimbrita, de poca extensión aflora en las localidades El Nabo, sobre el arroyo Mompani y en La Cañada.

Basalto lajeado que aflora en diversos lugares y diversas dimensiones en toda el área de estudio.

Tobas líticas que afloran en mínima área en las localidades de Menchaca, en La Cañada sobre el cauce del río Querétaro, al suroeste de El Nabo sobre el arroyo Mompani.

Sedimentos vulcanolacustres, existen prácticamente en toda el área de estudio y rellenan el graben de Querétaro hasta formar la planicie, formando el acuífero granular del valle.

Basalto, esta unidad conjuntamente con los depósitos aluviales conforman la mayor parte de los afloramientos presentes en la zona de estudio, se observan en los cerros: La Cruz, Las Campanas, Gordo y El Tambor entre otros.

Brecha volcánica, esta unidad se observa sobre la cima del cerro Cimatorio, el cerro El Nabo, sobre las márgenes del río Querétaro, sobre el corte de la carretera al Penal, en el extremo noroccidental del área estudiada entre otros lugares.

Aluvión y/o suelo residual que constituyen propiamente el valle de Querétaro formando la planicie del centro.

Rocas ígneas intrusivas, localizadas en las inmediaciones del poblado Juriquilla al norte de la ciudad de Querétaro.

En el acuífero del valle de Querétaro se tienen una serie de estructuras originadas por el tectonismo ocurridos en el Terciario. Dentro de estas estructuras se encuentra el graben de Querétaro, que es un extenso valle de forma poco alargada en dirección noroeste, sureste, relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos vulcanoclásticos lacustres potentes. Estos materiales están parcialmente saturados de agua y forman el acuífero del

valle de Querétaro. De acuerdo con estudios geofísicos la parte más profunda se encuentra entre las localidades de Santa María Magdalena y Corregidora y es de aproximadamente 600 m. Otras estructuras son una serie de fallas que se encuentran dentro del área de estudio, dentro de las fallas se pueden mencionar: falla Querétaro, al este; falla 5 de Febrero, al norte; falla El Tlacote, al oeste, en los límites con el estado de Guanajuato; Falla Obrajuelo, en el estado de Guanajuato; falla La cañada en la parte este, falla Menchaca en la parte noreste, la falla Sur, al sur del valle de Querétaro; y la falla Ixtla, al norte del valle de Obrajuelo.

Entre los efectos del sistema tectónico de las fallas Tlacote, Obrajuelo y Querétaro, se manifiesta a profundidad y localmente, la elevación de la temperatura del agua subterránea, a 29 °C en la mayor parte del valle pero es posible encontrar algunas captaciones de hasta 43 °C y en la zona de la laguna El Salitre de 90 °C.

La geología del subsuelo de acuerdo con los cortes litológicos de pozos por los que el agua circula esta constituida por los medios poroso y fracturado, los materiales de estos medios se encuentran intercalados e interdigitados entre sí y son los siguientes:

Medio poroso: Gravas, arenas, arcillas, tepetate arenoso, material aluvial de gravas y arcillas, aglomerado volcánico, toba lacustre, boleos inestables, conglomerados de clásticos medios y finos, arcilla, tobas arcillo arenosas, arena arcillosa, arcilla arenosa, gravas con arcilla, limo y tezontle.

Medio fracturado: andesitas, andesitas alteradas, ignimbritas, riolitas del Terciario y basaltos, brechas volcánicas, tobas líticas y vítreas del Cuaternario.

Cabe además mencionar que de los materiales anteriores se tiene la presencia considerable de arcillas y andesitas en toda el área de estudio. Las arcillas se encuentran principalmente en la zona de la ciudad de Querétaro y la zona industrial Benito Juárez. Los estratos de arcilla y andesita se encuentran intercalados con otros materiales de propiedades hidráulicas más favorables para la aportación de agua subterránea.

La disposición natural de las unidades litológicas agrupadas en los medios poroso y fracturado, conforman el sistema que define el flujo del agua subterránea en la zona de estudio, lo que constituye un acuífero del tipo libre, comportándose como confinado localmente en algunas localidades como el centro de la ciudad de Querétaro, la zona industrial Benito Juárez y San Pedro Mártir por la presencia de arcilla.

El acuífero es heterogéneo ya que está integrado por variaciones litológicas importantes, que se presentan en sentido horizontal y vertical.

En condiciones iniciales la fuente principal de recarga del agua al acuífero del valle de Querétaro provenía de la infiltración de la lluvia en las superficies permeables, por fracturamiento local de las sierras periféricas, en los lineamientos estructurales mayores. Otro mecanismo de recarga se realizaba por la infiltración en los cauces de las principales corrientes superficiales como son el río Querétaro, el arroyo El Pueblito y los arroyos La Gallina y Jurica.

Las recargas por entradas subterráneas horizontales, eran las siguientes: La Cañada, Jurica, Tlacote y El Pueblito, más la proveniente de la periferia semipermeable, los niveles del agua subterránea eran someros y el flujo se comportaba prácticamente siguiendo las pendientes de la cuenca superficial. Estas zonas de recarga estaban controladas por las variaciones estacionales y del nivel del río Querétaro que funcionaba como efluente natural.

Las descargas de la cuenca tenían lugar a través de manantiales en las partes altas, a través de la evapotranspiración debido al nivel somero que tenía el acuífero.

Por otra parte se tenía un drenado subterráneo hacia el acuífero de Los Apaseos como respuesta a cargas hidráulicas definidas por un sistema de flujo intermedio en un acuífero preponderantemente libre. El sentido del flujo en el acuífero era preferencialmente de oriente a poniente.

En esas condiciones originales, la recarga de agua total era igual a la descarga del sistema, condición que empezó a modificarse con la explotación del acuífero a mediados de la década de los 70's. En las figuras 2.24 y 2.25 se esquematizan las direcciones del flujo en las condiciones originales del acuífero.

El incremento de pozos y la continua explotación del acuífero hizo que los niveles del acuífero disminuyeran de forma considerable. La continua disminución de los niveles de saturación originó en primer lugar la cancelación de los volúmenes descargados a través de manantiales y poco después el cambio de régimen de escurrimiento permanente en los cauces. Los cuerpos de agua disminuyeron su tirante, por lo que la tasa de recarga procedente del escurrimiento disminuyó. Estos fenómenos incidieron también en el fenómeno de la evapotranspiración por lo que la humedad relativa del ambiente también decreció considerablemente.

Cuando el nivel freático disminuyó de tal forma que alcanzó las capas de baja conductividad hidráulica, el acuífero varió en algunas localidades de libre a confinado y se definieron dos sistemas de flujo subterráneo: un sistema de flujo local y otro sistema de flujo intermedio, los cuales se describen a continuación.

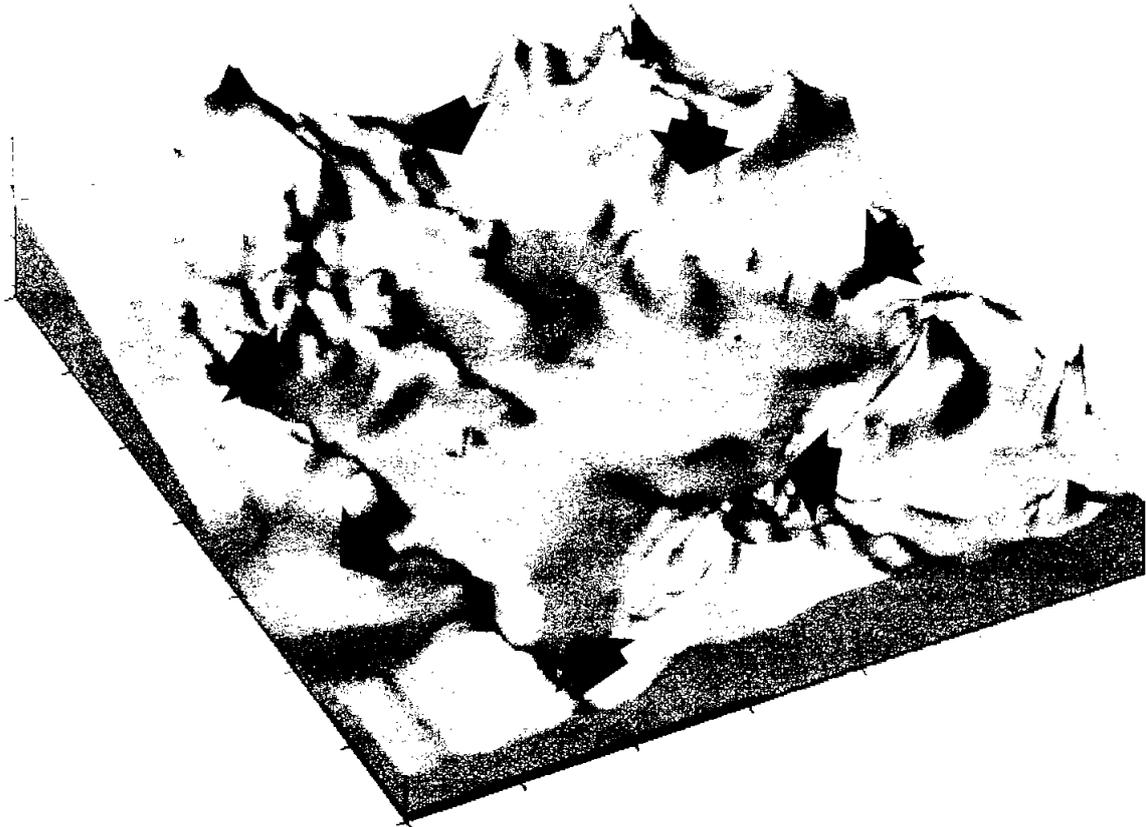


Figura 2.24. Direcciones del flujo en condiciones iniciales del acuífero.

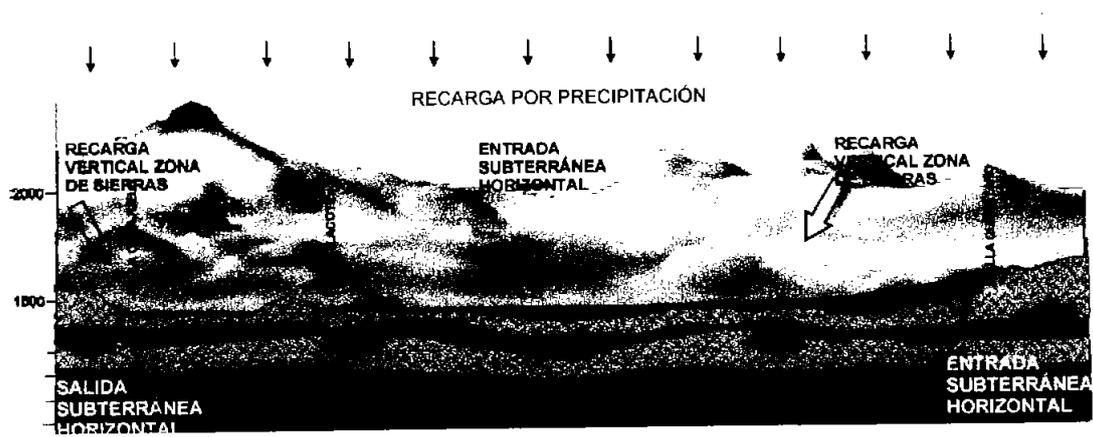


Figura 2.25. Esquema conceptual del flujo en el estado original del acuífero.

Sistema de flujo local. Lo forma una zona con elevaciones del nivel freático que presentan un comportamiento local de poca profundidad en la zona central del valle, éste se presenta principalmente a lo largo del cauce del río Querétaro, identificándose este comportamiento en los pozos 959, 992, 1434, 595 y 743. En este sistema de flujo los niveles se encontraban para 1996 entre 15 y 40 m de profundidad y se infiere que está limitado en su parte inferior por una capa semiconfinante que en algunas localidades se presenta en medios porosos y en otras en fracturado. Se observa este comportamiento generalmente a lo largo del cauce del río Querétaro.

Sistema de flujo intermedio. En este sistema las líneas de flujo responden a cargas hidráulicas menores respecto del flujo local. Cabe destacar que este sistema sustenta casi el total de extracción en el valle y que está formado también por el medio poroso y fracturado. El nivel del agua subterránea en este sistema variaba de 90 a 110 metros de profundidad en la mayor parte del valle y de 170 metros en las zonas menos permeables como el subsuelo de la zona industrial Benito Juárez.

De acuerdo con la temperatura del agua subterránea se tienen registros que indican la presencia de termalismo principalmente en las localidades de San Bartolo Agua Caliente y la laguna El Salitre; ambas alineadas con la falla El Salitre.

Se observa que en los niveles estáticos que presenta el acuífero hasta diciembre de 1999, el sistema de flujo ha sufrido modificaciones respecto al flujo inicial. Se han generado conos de abatimiento en la parte central de la ciudad de Querétaro y San Pedro Mártir.

En la zona de descarga horizontal del acuífero hacia el acuífero de Obrajuelo los gradientes del agua subterránea se han invertido modificando el sistema de flujo, de tal forma que se ha formado un parteaguas subterráneo, producto de la explotación que se tienen tanto en el acuífero de Los Apaseos como en el de Obrajuelo, teniéndose un pequeño canal de descarga en la parte superior de esa frontera con gradientes hidráulicos muy pequeños.

En la zona sur (entrada al valle del río el Pueblito) se consideró que actualmente no existe recarga horizontal debido a que en esa zona se tienen pozos con niveles estáticos altos (pozos 2052 y 1947) con respecto a los niveles estáticos de otros pozos ubicados dentro del valle, con una diferencia aproximada de hasta 100 m por lo que es probable que se tenga una frontera impermeable por la presencia de la falla Sur. Por otro lado, en el trabajo realizado por la Universidad Autónoma de Querétaro (CEA-UAQ, 2002) se presentan resultados que indican que dicha falla (denominada como falla Cuesta China en dicho trabajo) forma una frontera de baja permeabilidad que impide la recarga local al graben.

Como se dijo anteriormente en la zona sur, en condiciones iniciales el acuífero presentaba una zona de recarga en donde se tiene la entrada del río el Pueblito al valle, probablemente esto era posible debido a que inicialmente los niveles del agua subterránea eran someros y en los estratos superiores se presentaba el flujo de recarga hacia el acuífero del valle de Querétaro, es posible que al abatirse los niveles debido a la explotación del acuífero las características impermeables de los estratos más profundos y la presencia de la falla hicieran que se tuviera en esta zona una barrera impermeable que no permite la recarga subterránea al acuífero. En las figuras 2.26 y 2.27 se esquematiza el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico actual del acuífero.

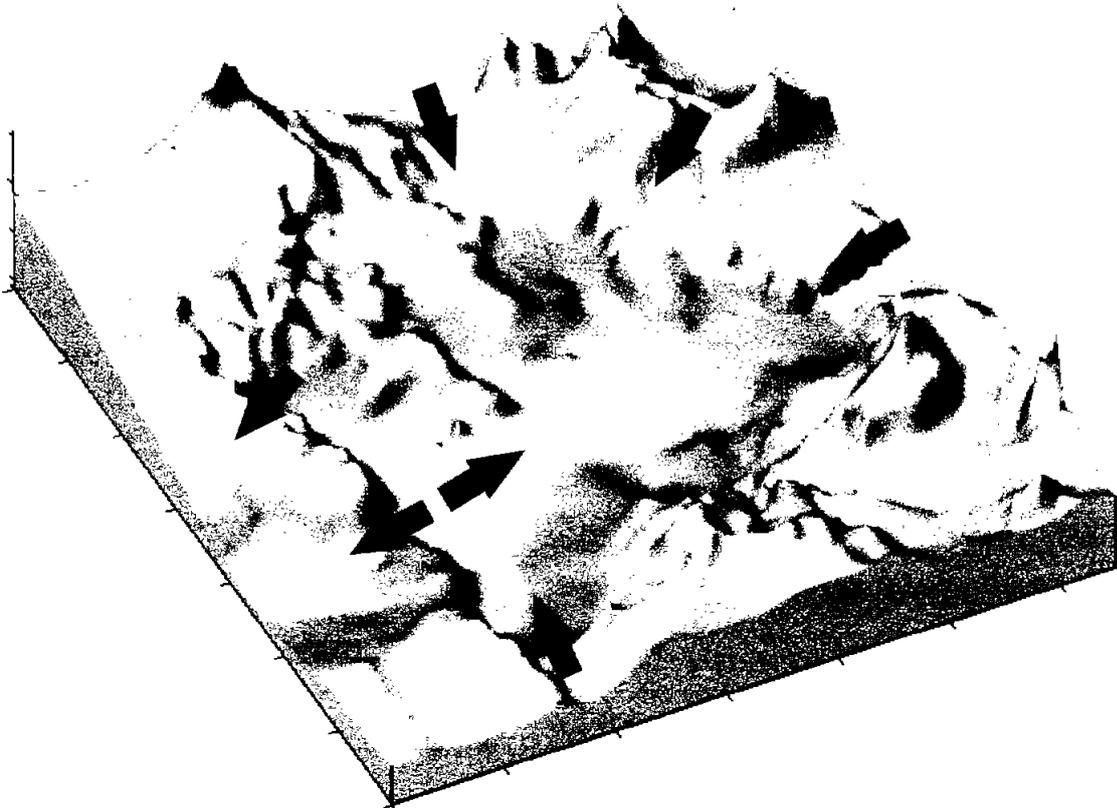


Figura 2.26. Vista en planta del modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.



Figura 2.27. Modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

2.5 Balance hidrogeológico

Para establecer el balance global de masa, el sistema de agua subterránea se representa como una caja negra en donde las cantidades de agua que pasan en un periodo dado de tiempo se resumen en la ecuación de continuidad (Spitz y Moreno, 1996):

$$\text{Cambio en el almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas} \quad (2.1)$$

Los elementos de la ecuación se muestran en la figura 2.28 y se pueden escribir para un sistema de agua subterráneo específico como:

$$Q_s(t + \Delta t) - Q_s(t) = \Delta Q_s = (\pm Q_N \pm Q_R \pm Q_B \pm Q_L \pm Q_W) \Delta t, \quad (2.2)$$

$$\Delta Q_s = AS(h(t + \Delta t) - h(t)),$$

donde

ΔQ_s	=	Cambio en el almacenamiento Q_s [L^3]
$\pm Q_N$	=	Recarga o descarga natural del agua subterránea [L^3/T]
$\pm Q_R$	=	Intercambio con el agua superficial [L^3/T]
$\pm Q_B$	=	Flujo subsuperficial sobre la frontera [L^3/T]
$\pm Q_L$	=	Componentes de filtraciones que vienen de acuíferos adyacentes [L^3/T]
$\pm Q_W$	=	Extracción o inyección local tales como pozos [L^3/T]
t	=	Tiempo [T]
Δt	=	Incremento de tiempo [T]
A	=	Área del acuífero investigado [L^2]
S	=	Rendimiento específico.

El flujo de agua subterránea en estado permanente, para el que el término del cambio de almacenamiento es cero, es un caso especial de la ecuación 2.2.

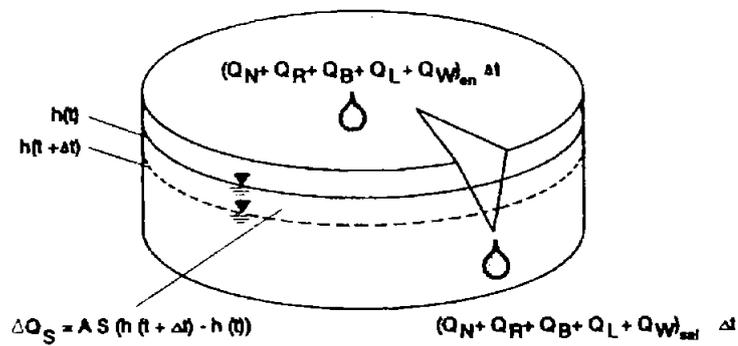
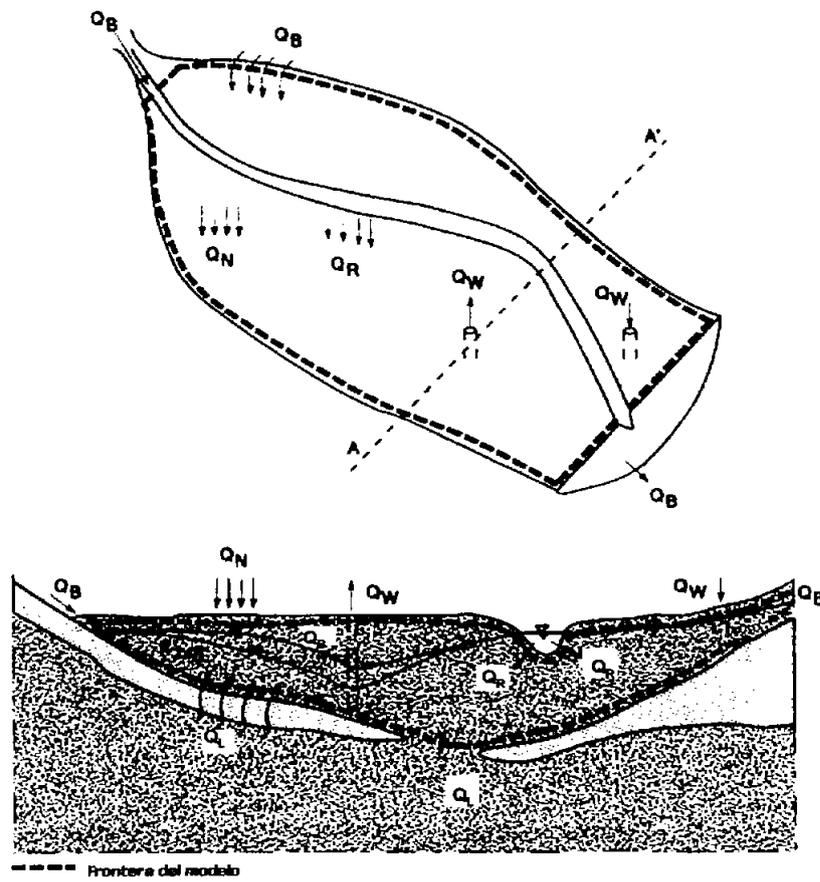


Figura 2.28 Elementos de un balance hidrogeológico (tomado de Spitz y Moreno, 1996).

Al utilizar ese tipo de balance con frecuencia se busca obtener la fluctuación media del nivel estático del agua que resulta de los cambios de las entradas y las salidas en el sistema de agua subterráneo.

2.5.1 Área y periodos de balance

La zona de balance del estudio tiene una superficie de 379.25 km² (figura 2.29). Los periodos de balance que se consideraron son los siguientes:

01 agosto 1985 – 31 julio 1990	5 años
01 agosto 1990 – 30 noviembre 1993	3.3 años
01 diciembre 1993 – 30 noviembre 1995	2 años

A pesar de que se cuenta con datos piezométricos para el año de 1981 y 1999 no se utilizaron porque para el periodo 1981-1985 no se tiene confiabilidad de los datos de la extracción por bombeo ya que éstos son producto de la reconstrucción del bombeo realizada por la empresa Guysa (1996) y no de un censo de los volúmenes de extracción. Por otro lado el periodo 1995-1999 no se incluye en el balance debido a que no se tienen suficientes datos del nivel estático para el año de 1999 además de que para este periodo se supone que la extracción por bombeo es constante de acuerdo con la extracción que se tiene para el año de 1996.

2.5.2 Recarga vertical

Se consideran las siguientes recargas o entradas verticales para el acuífero del valle de Querétaro (término Q_N en la ecuación 2.2).

- Recarga natural (debida a la precipitación)
- Recarga por retorno de riego
- Recarga por retornos de riego de aguas negras
- Recarga por fugas en la red municipal de agua potable

Recarga natural (precipitación)

La recarga natural es el volumen que recibe una unidad hidrogeológica en un intervalo específico de tiempo por infiltración de la precipitación atmosférica y de los escurrimientos superficiales naturales generados por esta.

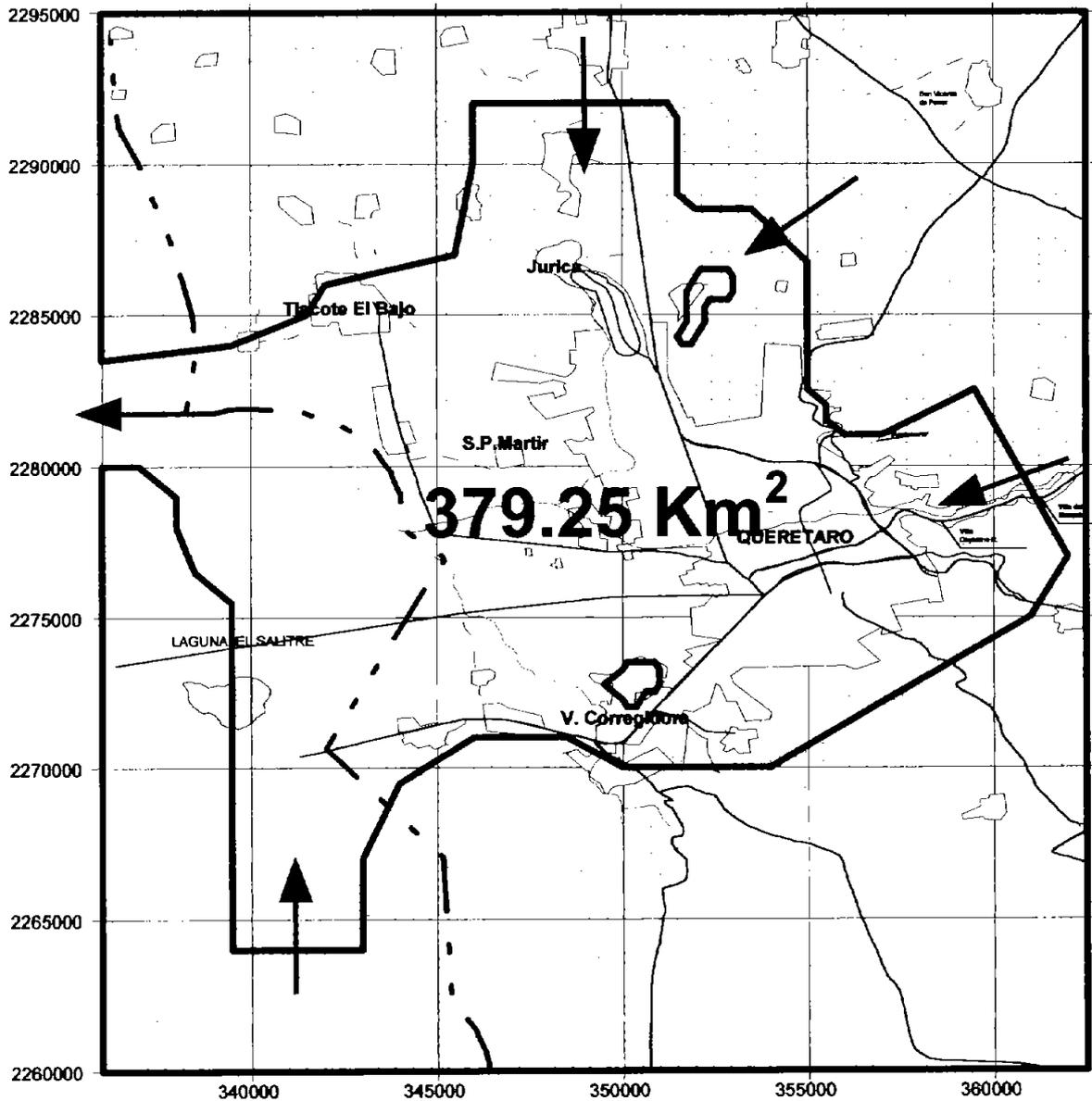


Figura 2.29. Área del balance de masa.

Con el fin de obtener el volumen probable de recarga natural para los años que comprenden los periodos de modelación se tienen datos de precipitación de las estaciones El Pueblito, Juriquilla y Querétaro tomados de la base de datos ERIC II y del estudio de Guysa (1996). En la tabla 2.2 se presentan los datos de precipitación media anual de 1980 a 1999. Para los años en que se tienen datos de precipitación para dos o tres estaciones y considerando que hay poca variación en la lámina de precipitación entre las estaciones se tomó el promedio aritmético, para los años en que solo se tiene dato de una estación se considera a éste como el representativo de la zona. La estimación de la recarga se realizó multiplicando la precipitación media anual de cada periodo por un coeficiente de infiltración, este método se recomienda en CFE (1983) y se ha utilizado en otros estudios (ver por ejemplo Nijenda, 2001). En la tabla 2.3 se presenta la precipitación media anual por cada periodo y el volumen promedio precipitado por año, obtenido multiplicando la precipitación media por el área de estudio.

Tabla 2.2 Precipitación media anual.

AÑO	PUEBLITO (mm)	JURIQUILLA QRO (mm)	QUERETARO (mm)	PROMEDIO (mm)
1980		ND	ND	630.80
1981		ND	ND	573.10
1982		ND	ND	416.10
1983		ND	ND	584.50
1984	519.2	505.9	459.9	495.00
1985	652.2	652.5	697.4	667.37
1986		ND	ND	666.60
1987	429.4	427.2	ND	428.30
1988	453.6	393.4	ND	423.50
1989	482.8	448.8	352.9	428.17
1990	442.8	ND		483.75
1991	693.6	ND		663.40
1992	ND	813.5		809.40
1993	515.2	451.5		471.40
1994	540.4	665.2		554.43
1995	545	582.9		578.50
1996	426.6	ND	ND	426.6
1997	448.6	ND	ND	448.6
1998	706.5	ND	ND	706.5
1999	414.3	ND	ND	414.3

FALTAN DATOS PARA UNO O DOS MESES (ERIC II)

 FALTAN DATOS DE LLUVIA PARA VARIOS DIAS (ERIC II)

 DATOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO GUYSA, 1996

Del estudio realizado por la empresa Lesser, 1995, se tomaron los datos de los pozos de uso agrícola y de la superficie de riego que éstos satisfacen. Los datos tomados para estimar la recarga por retornos de riego en esta zona son los siguientes:

- Superficie de riego 2354 has.
- Volumen de agua utilizado para riego 1995 43.5 Mm³/año

El volumen total de agua utilizado para riego es de 74.5 Mm³/año.

El volumen de agua que recarga al acuífero es el siguiente.

Recarga vertical por retornos de riego $R_v = 74.5\alpha$ Mm³/año

Retornos por riego de aguas negras o municipales.

Para el riego con aguas negras o municipales Guysa (1996) cuantificó un volumen de 43 Mm³/año que la población de casi un millón de personas vertía a la red de drenaje municipal en 1995.

De acuerdo al censo realizado en 1994, se sabía que existían poco más de 2,000 hectáreas de tierras que eran susceptibles de ser regadas con agua residual. De éstas, eran regadas realmente 700 has aproximadamente en por lo menos la mitad del año, es decir, que se necesitaban por lo menos 11 de los 43 Mm³/año de este tipo de agua para soportar la demanda. El resto se evaporaba y/o escurría a través del río Querétaro en su trayecto hacia el estado de Guanajuato (Guysa, 1996). De los datos anteriores puede estimarse la recarga de la siguiente manera:

- Volumen de aguas negras 43 Mm³/año
- Sup. susceptible de ser regadas con aguas negras 2000 has. (1994)
- Superficie real regada con aguas negras. 700 has.
- Volumen para regar esa superficie 11 Mm³/año

La recarga vertical por riego de aguas negras o municipales es: $R_v = 11\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$

Recarga por fugas en la red de abastecimiento municipal de agua potable.

Otra lámina de recarga que se suma a la recarga vertical, es la que proviene de pérdidas por fuga en la red de abastecimiento municipal. A este respecto, la información más reciente con la que se cuenta es la proporcionada por un estudio de evaluación de pérdidas de agua potable en la ciudad de Querétaro realizado por el IMTA (1992). En este estudio se indica que la producción por pozos de agua potable era de 1783.7 l/s, la producción anual en el valle era de 56.26 Mm³, y que el porcentaje de pérdidas por fugas en la red municipal de agua potable era del 16.7 % por lo que el volumen de pérdidas y de recarga al acuífero es el siguiente:

- Producción por pozos de agua = 1783.7 l/s
- Volumen anual = 56.26 Mm³/año
- Porcentaje de fugas = 16.7 %
- Volumen de pérdidas = 9.39 Mm³/año

La recarga vertical por fugas en la red municipal es: $R_v = 9.39\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$

De todo lo anterior se tiene que la recarga vertical estimada para el acuífero en estudio es la siguiente:

Recarga natural

85-90	$R_v = 184.34\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$
90-93	$R_v = 245.78\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$
93-95	$R_v = 214.83\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$

Recargas debida a retornos de riego y fugas en la red municipal se suponen constante para todos los periodos y son las siguientes:

Retorno por riego	$R_v = 74.5\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$
Retorno por riego de aguas negras	$R_v = 11\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$
Recarga por pérdidas en la red de agua potable	$R_v = 9.39\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$
Total de la recarga vertical por riego y fugas	$R_v = 94.89\alpha \text{ Mm}^3/\text{año}$

Como se mencionó anteriormente, el coeficiente de infiltración se estimará al realizar el balance de masa de los tres periodos. Como se mencionó antes la recarga vertical debida a retornos por riego y fugas en la red municipal de agua potable se suponen constantes para los cinco periodos del balance. La figura 2.30 muestra la distribución de las zonas de recarga por riego y por fugas en la red municipal de agua potable.

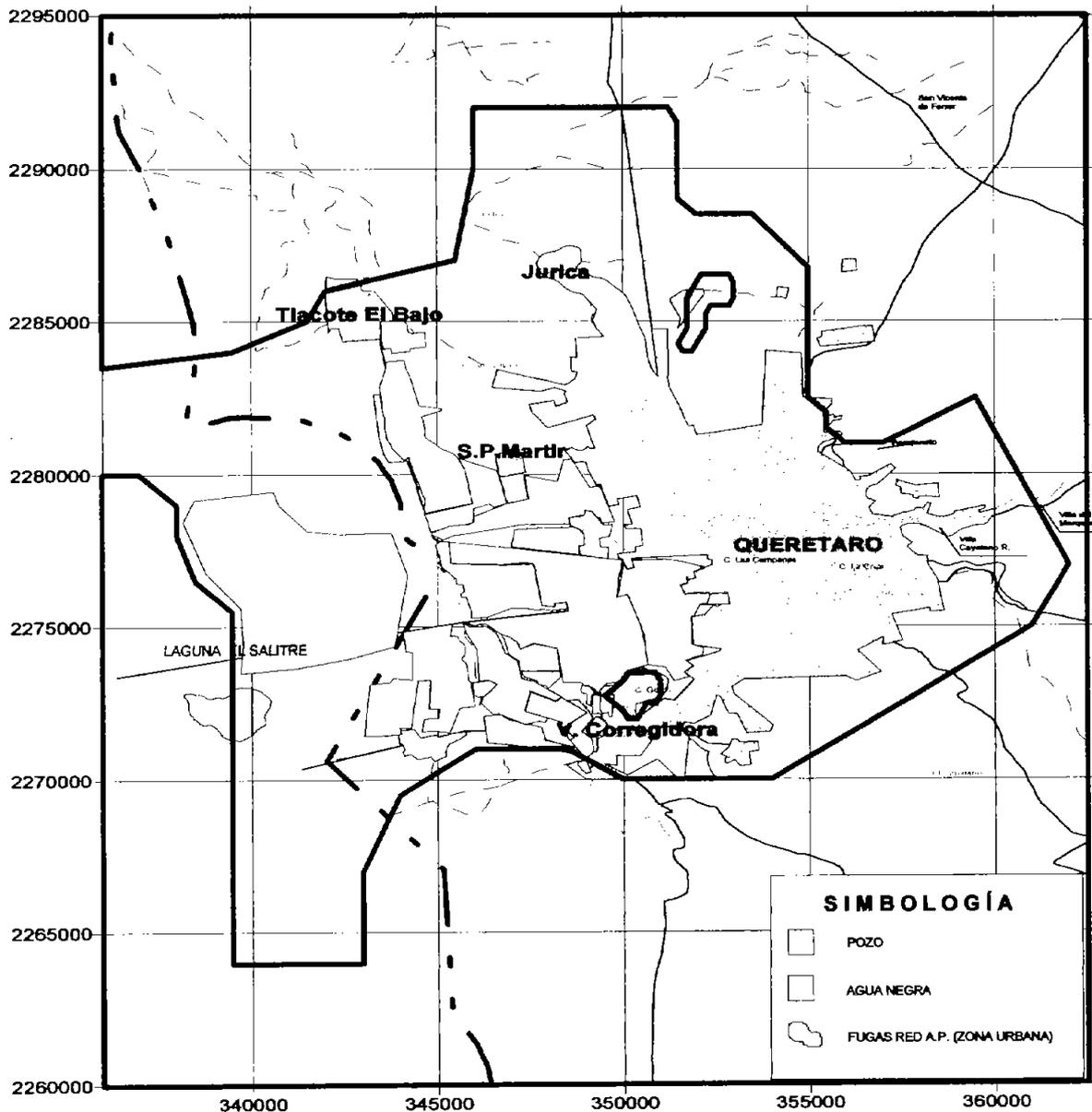


Figura 2.30. Zonas de recarga por retornos de riego y fugas en la red de agua potable.

2.5.3 Entradas y salidas subterráneas.

Para estimar las entradas y salidas subterráneas se utilizaron las configuraciones piezométricas para los años arriba mencionados, en estas configuraciones se esquematizaron y midieron los canales de entradas y salidas subterráneas. En las figuras 2.11 a 2.16 se observan los canales para cada uno de los años. Una vez que se tuvieron definidos los canales de entrada y salida subterránea se hizo la estimación de los volúmenes

de recarga y/o descarga aplicando la Ley de Darcy. En las tablas 2.4 a 2.7 se presentan los resultados al estimar los canales de flujo subterráneo.

Tabla 2.4. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1985.

Celda	Ubic.	k (m/día)	Espesor b (m)	T (m ² /día)	Longitud L (m)	i	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /año)	Total (m ³ /año)
ENTRADAS									
1	Cañada	0.28	480	134.40	1864.61	0.0119	2982.1826	1088496.667	
2	Cañada	1.08	480	518.40	2353.53	0.0158	19277.105	7036143.413	
3	Cañada	0.15	480	72.00	2798.95	0.0188	3788.6587	1382860.433	
4	Noreste	0.15	270	40.50	2040.66	0.0150	1238.048	451887.5256	
5	Noreste	0.03	300	9.00	2033.55	0.017	311.13315	113563.5998	
6	Norte	0.15	280	42.00	1654.87	0.0235	1633.3567	596175.1919	
7	Norte	0.21	280	58.80	2193.07	0.0249	3210.9176	1171984.942	
8	Norte	0.21	280	58.80	1850.92	0.0264	2873.2201	1048725.349	
9	Suroeste	0.18	300	54.00	3543.40	0.018	3444.1848	1257127.452	
SALIDAS									
10	Apaseos	1.72	290	498.8	1154.89	0.001411	812.81944	296679.0939	
11	Apaseos	1.72	240	412.8	2970.93	0.0016	1962.2398	716217.5439	
12	Apaseos	1.72	230	395.6	1595.05	0.0076	4795.6135	1750398.938	2763295.576

Tabla 2.5. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1990.

Celda	Ubic.	k (m/día)	Espesor b (m)	T (m ² /día)	Longitud L (m)	i	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /año)	Total (m ³ /año)
ENTRADAS									
1	Cañada	0.28	440	123.20	2949.11	0.0152	5522.62	2015756.79	
2	Cañada	1.08	400	432.00	2150.24	0.0198	18392.29	6713186.90	
3	Cañada	0.15	390	58.50	2256.86	0.0173	2284.06	833680.13	
4	Noreste	0.15	260	39.00	2044.61	0.0140	1114.76	406888.23	
5	Noreste	0.03	300	9.00	2003.40	0.0149	268.66	98059.42	
6	Norte	0.15	290	43.50	1983.68	0.0224	1932.90	705507.69	
7	Norte	0.21	280	58.80	1895.27	0.0229	2552.02	931486.92	
8	Norte	0.21	260	54.60	1717.75	0.0223	2091.50	763396.79	
9	Suroeste	0.18	290	52.20	3559.56	0.0206	3827.67	1397098.11	

Celda	Ubic.	k (m/día)	Espesor b (m)	T (m ² /día)	Longitud L (m)	i	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /año)	Total (m ³ /año)
SALIDAS									
10	Apaseos	1.72	240	412.8	2649.47	0.003	3281.10	1197602.83	
11	Apaseos	1.72	220	378.4	1774.59	0.006	4029.03	1470595.63	2668198.47

Tabla 2.6. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1993.

Celda	Ubic.	k (m/día)	Espesor b (m)	T (m ² /día)	Longitud L (m)	i	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /año)	Total (m ³ /año)
ENTRADAS									
1	Cañada	0.28	430	120.40	2489.94	0.0175	5246.30	1914900.81	
2	Cañada	1.08	390	421.20	2446.94	0.0293	30198.08	11022298.49	
3	Cañada	0.15	400	60.00	2558.67	0.0243	3730.54	1361647.41	
4	Noreste	0.15	260	39.00	2033.17	0.0150	1192.58	435290.31	
5	Noreste	0.03	300	9.00	2018.94	0.0154	279.83	102136.16	
6	Norte	0.15	270	40.50	1877.59	0.0212	1612.10	588416.05	
7	Norte	0.21	270	56.70	2078.14	0.0232	2733.67	997789.00	
8	Norte	0.21	270	56.70	1681.1	0.0236	2249.51	821072.44	
9	Suroeste	0.18	290	52.20	3522.9	0.0200	3677.91	1342436.27	18585986.94
SALIDAS									
10	Apaseos	1.72	240	412.80	2627.37	0.0036	3904.48	1425135.93	
11	Apaseos	1.72	215	369.80	2036.92	0.0026	1958.46	714837.11	2139973.05

Tabla 2.7. Estimación del volumen de entradas y salidas para 1995.

Celda	Ubic.	k (m/día)	Espesor b (m)	T (m ² /día)	Longitud L (m)	i	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /año)	Total (m ³ /año)
ENTRADAS									
1	Cañada	0.28	460	128.80	2378.03	0.019	5819.52	2124122.98	
2	Cañada	1.08	440	475.20	2284.32	0.0307	33325.12	12163669.58	
3	Cañada	0.15	440	66.00	3002.93	0.0275	5450.32	1989366.05	
4	Noreste	0.15	260	39.00	2032.85	0.01257	996.56	363745.88	
5	Noreste	0.035	260	9.10	2020.98	0.0127	233.56	85251.10	
6	Norte	0.15	270	40.50	1998.98	0.021	1700.13	620548.36	
7	Norte	0.21	270	56.70	1965.37	0.024	2674.48	976183.56	
8	Norte	0.21	270	56.70	1673.65	0.0241	2286.99	834752.27	

Celda	Ubic.	k (m/día)	Espesor b (m)	T (m ² /día)	Longitud L (m)	i	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /año)	Total (m ³ /año)
9	Suroeste	0.18	280	50.40	3515.22	0.0196	3472.47	1267453.35	20425093.12
SALIDAS									
10	Apaseos	1.72	235	404.20	1042.26	0.0063	2654.07	968736.79	
11	Apaseos	1.72	190	326.80	3182.17	0.0025	2599.83	948939.00	1917675.80

En la tabla 2.8 se presenta un resumen de las entradas y salidas, volumen promedio por año de entradas y salidas y el volumen estimado promedio por periodo.

Tabla 2.8. Resumen de entradas y salidas subterráneas.

Año	Q m ³ /año	Q promedio m ³ /año	Q m ³ /periodo
ENTRADAS			
1985	14,146,964.57		
		14,006,012.78	70,030,063.88
1990	13,865,060.98		
		16,225,523.96	53,544,229.06
1993	18,585,986.94		
		19,505,540.03	39,011,080.06
1995	20,425,093.12		
SALIDAS			
1985	2,763,295.58		
		2,715,747.02	13,578,735.10
1990	2,668,198.47		
		2,404,085.76	8,005,605.57
1993	2,139,973.05		
		2,028,824.42	4,057,648.84
1995	1,917,675.80		

Se observa en la tabla 2.8 que las entradas subterráneas tienden a aumentar y las salidas a disminuir, este comportamiento se debe a la extracción por bombeo que se tiene en el acuífero en las zonas de recarga se induce un aumento, sucediendo lo contrario en las zonas de descarga en donde el flujo de salida se invierte hacia las zonas de mayor explotación del acuífero.

2.5.4 Extracción por bombeo.

Con respecto al volumen de extracción que se tiene por bombeo de pozos en el acuífero en estudio se tomaron los volúmenes estimados en la reconstrucción de bombeo realizada por la empresa Guysa en 1996, más los volúmenes de extracción que se tienen de los pozos ubicados en el acuífero de Obrajuelo. En la tabla 2.9 se presenta un resumen de los volúmenes de extracción por año en millones de metros cúbicos.

Tabla 2.9. Resumen de los volúmenes de extracción.

Año	Volumen Mm³/año	Volumen Mm³/periodo	Volumen Mm³/año
1985	121.32		
1986	125.54		
1987	130.19		
1988	134.90		
1989	140.80		
1990	145.58	677.01	135.40
1991	147.89		
1992	150.83		
1993	155.55	454.27	151.42
1994	154.16		
1995	150.89	305.05	152.52

2.5.5 Volumen drenado.

El volumen drenado se estima por medio del volumen comprendido entre dos superficies piezométricas al inicio y final de un periodo multiplicado por el rendimiento específico. Para determinar el volumen drenado ocurrido en cada uno de los periodos analizados, se utilizó el programa Surfer (Golden Software, Inc, 2002). En la tabla 2.10 se presenta en forma resumida la información respectiva de volúmenes para cada periodo.

Tabla 2.10. Volumen drenado.

Periodo	Área (Km ²)	Vol. (Mm ³ /periodo)	No. de Años	Vol. (Mm ³ /año)	Abat. Por periodo (m)	Abat. por Año (m)	Sy
1985-1990	379.25	4881.19	5.00	976.24	12.87	2.57	0.138
1990-1993	379.25	3149.68	3.30	954.45	8.31	2.52	0.144
1993-1995	379.25	2203.6	2.00	1101.80	5.81	2.91	0.138

En la tabla 2.10 se hace además la estimación del rendimiento específico. Se observa que los valores del rendimiento específico para cada uno de los periodos del balance son muy parecidos. Estos valores se compararán con los resultados de las ecuaciones del balance en donde el rendimiento específico se tiene como incógnita.

2.5.6 Elementos de la ecuación de balance volumétrico para los diferentes periodos.

Los elementos de la ecuación de balance para cada periodo tienen solución resolviendo la ecuación siguiente:

$$E_h + R_v - B - S_h = -\Delta VS_y \quad \dots\dots(2.3)$$

Donde:

E_h = Entradas subterráneas.

B = Bombeo.

S_h = Salidas subterráneas

R = Recarga vertical

S_y = Rendimiento específico

En la tabla 2.11 se presentan los valores de los parámetros conocidos normalizados por año para sustituirse en la ecuación 2.3.

Tabla 2.11. Balance volumétrico.

Periodo	Precipitación Mm ³ /año	riego y fugas Mm ³ /año	R _v Mm ³ /año	Eh Mm ³ /año	B Mm ³ /año	Sh Mm ³ /año	ΔV Mm ³ /año
1985-1990	184.34 α	94.89 α	279.23 α	14.01	135.4	2.72	976.24
1990-1993	245.78 α	94.89 α	340.67 α	16.23	151.42	2.4	954.45
1993-1995	214.83 α	94.89 α	309.72 α	19.51	152.52	2.03	1101.80

Sustituyendo los datos de la tabla 3.11 en la ecuación 2.3 se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\text{Periodo 1985-1990} \quad 279.23\alpha - 124.11 = -976.24(S_y) \quad \dots\dots(2.4)$$

$$\text{Periodo 1990-1993} \quad 340.67\alpha - 123.83 = -954.45(S_y) \quad \dots\dots(2.5)$$

$$\text{Periodo 1993-1995} \quad 309.72\alpha - 135.04 = -1101.80(S_y) \quad \dots\dots(2.6)$$

Simplificando cada una de las ecuaciones anteriores, esto es, dividiendo ambos miembros de cada una de las ecuaciones entre el coeficiente que afecta a α, tenemos:

$$\text{Periodo 1985-1990} \quad \alpha + 3.496(S_y) = 0.444 \quad \dots\dots(2.7)$$

$$\text{Periodo 1990-1993} \quad \alpha + 2.802(S_y) = 0.363 \quad \dots\dots(2.8)$$

$$\text{Periodo 1993-1995} \quad \alpha + 3.557(S_y) = 0.436 \quad \dots\dots(2.9)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones por el método de mínimos cuadrados (figura 2.31) se obtuvieron los siguientes valores:

Rendimiento específico (S _y):	0.1046
Coefficiente de infiltración (α)	0.0712
Coefficiente de correlación lineal:	0.97

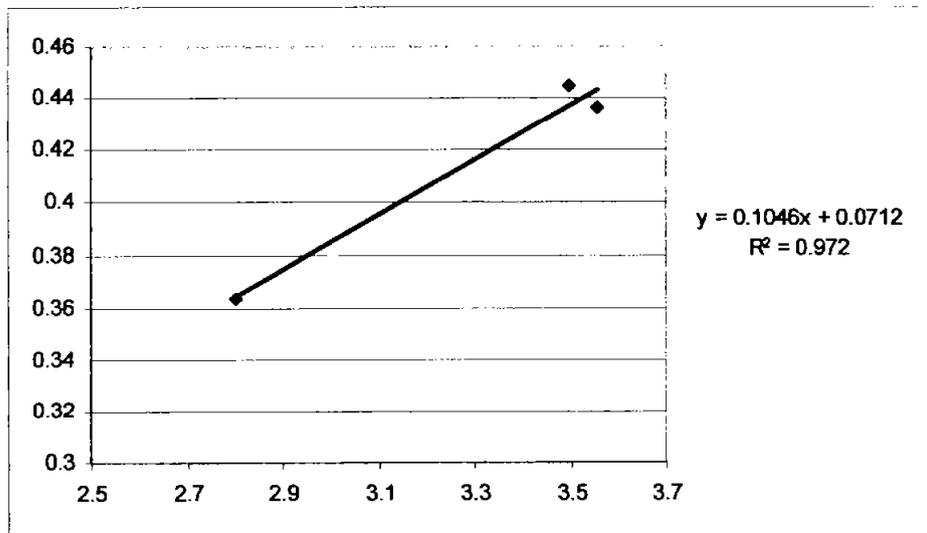


Figura 2.31. Estimación de los parámetros del balance para los periodos 85-90, 90-93 y 93-95.

Se observa que el coeficiente de correlación es bastante bueno.

El valor del rendimiento específico estimado fue de 0.1046 que difiere de los estimados en la tabla 2.10, aunque están en el mismo orden de magnitud. Esta variación se tomará en cuenta en la etapa de calibración del modelo. Para el balance de masa se utilizó el estimado con las ecuaciones de balance considerando que toma en cuenta la correlación que tienen entre sí los elementos del balance en los tres periodos.

La infiltración estimada por el método de los cloruros (Anexo IV) fue de 4.68 % de la precipitación media anual y el promedio de la infiltración estimada por el método de balance de agua superficial (Anexo V) fue de 4.3 %. Se puede observar que el valor estimado en el balance de masa es del mismo orden de magnitud del valor del coeficiente de infiltración estimado por los métodos anteriores.

La recarga vertical estimada para cada uno de los periodos es la siguiente:

Periodo 85-90	19.88 Mm ³ /año
Periodo 90-93	24.26 Mm ³ /año

Periodo 93-95 20.23 Mm³/año

El déficit que se tiene en el acuífero por periodos se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 2.12. Déficit por periodos.

Periodo	R_v Mm³/año	E_h Mm³/año	B Mm³/año	Sh Mm³/año	Déficit Mm³/año	Déficit m/año
1985-1990	19.88	14.01	135.4	2.72	104.23	2.62
1990-1993	24.26	16.23	151.42	2.4	99.57	2.51
1993-1995	20.23	19.51	152.52	2.03	114.81	2.89

En promedio se tiene que el acuífero presenta una recarga vertical de 21.46 Mm³/año, recarga horizontal sobre las fronteras de 16.58 Mm³/año, extracción por bombeo de 146.45 Mm³/año, descarga horizontal sobre las fronteras de 2.38 Mm³/año y un déficit en el acuífero de 110.79 Mm³/año lo que origina un abatimiento promedio anual de 2.67 m. durante el periodo 1985 – 1995.

Se realizó una revisión de las ecuaciones de balance considerando que la columna Sh (salidas sobre las fronteras) de la tabla 2.11 es igual a cero, esto se hizo tomando en cuenta que en la zona que se tiene como descarga del acuífero hacia la zona de Los Apaseos no se tienen datos suficientes para la interpretación del comportamiento hidráulico del acuífero en esa zona y podría también tenerse una frontera impermeable debido a que esta frontera se ubica en una zona de lomeríos. Los resultados fueron los siguientes:

Rendimiento específico (S_y): 0.1033
 Coeficiente de infiltración (α) 0.067
 Coeficiente de correlación lineal: 0.98

Se observa que estos datos no difieren de forma importante respecto a los estimados anteriormente.

3. MODELO DE FLUJO

3.1 Selección del área modelada

El área de modelación se definió con base en la geometría del acuífero, es decir considerando las dimensiones físicas del acuífero: la topografía de la cima y el basamento, así como la localización de los flancos del acuífero. La estructura de la cima y el basamento del acuífero se pueden caracterizar por un gran número de pozos (y por la topografía del terreno en donde el acuífero en estudio se encuentra expuesto) y se cuenta con datos de los niveles estáticos del agua subterránea para definir la cima del acuífero. Aunque el espesor de la formación no está definido con precisión en cada punto del acuífero esa incertidumbre es aceptable y no se espera que afecte significativamente los resultados del modelo.

Se realizó una configuración promedio de los niveles estáticos, esta configuración se hizo mediante la ayuda de Surfer, haciendo un promedio de las superficies freáticas que se analizaron de 1981 a 1999. Con base a este promedio de elevaciones se definió un parteaguas subterráneo que se presenta en el lado oeste justo en la zona de la laguna El Salitre y Obrajuelo en el estado de Guanajuato. Además de los niveles estáticos se tomaron en cuenta la topografía y la geología del lugar para determinar el dominio del modelo. La figura 3.1 muestra la configuración piezométrica promedio y la definición de las fronteras. En esta figura se aprecia el parteaguas subterráneo en la zona de la laguna El Salitre, las zonas de recarga y descarga subterráneas del acuífero así como las fronteras sin flujo del mismo. Estas características ayudaron a definir las fronteras del área a modelar, teniéndose una superficie de modelación de 379.25 km².

La superficie del modelo considera principalmente la zona plana que del valle de Querétaro que se extiende de este a oeste, en donde se localizan la ciudad de Querétaro, la zona industrial Benito Juárez, la zona agrícola y Obrajuelo; al sur el poblado de Villa Corregidora y una pequeña porción cerro El Cimatorio; al norte, las zonas montañosas del valle de Buenavista que se consideran como zonas de recarga, Jurica y Tlacote el Bajo.

3.2 Tipo de modelo

Para el desarrollo del modelo se utilizó el simulador PTC que es un modelo de flujo y transporte del agua subterránea (Babu et al., 1997). PTC usa la ecuación diferencial parcial que describe el flujo de agua subterránea para la carga hidráulica. La ecuación fundamental del flujo del agua subterránea es (Pinder, 2002):

$$\nabla \cdot q = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} - Q \quad (3.1)$$

$$q = -K \cdot \nabla h \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot K \cdot \nabla h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (3.3)$$

donde K es la conductividad hidráulica, h es la carga hidráulica, S_s es el almacenamiento específico, y Q es el término de sumidero (por ejemplo, pozos de bombeo). Cambiando el signo de Q , se obtiene un término de fuente que se puede identificar con la infiltración neta debida a la precipitación. La conductividad hidráulica es una matriz. Esto es, en general presenta las propiedades direccionales y tiene nueve coeficientes en un sistema tridimensional.

La conductividad hidráulica se puede representar por

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Cuando cualquiera de las tres componentes diagonales de esta matriz son diferentes de los otros, el acuífero se llama anisotrópico. De igual forma, cuando estas componentes son iguales, el acuífero se llama isotrópico.

Cuando las componentes de la matriz de conductividad hidráulica son constantes en el espacio, esto es, el valor no varía de un punto a otro dentro del acuífero, el acuífero se llama homogéneo. Cuando dichos valores están en función del espacio, el acuífero se llama heterogéneo.

Para ver el impacto de esta representación sobre el sistema escribamos la ley de Darcy como:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

La componente de flujo en la dirección x se puede ahora representar a través de la multiplicación matriz-vector

$$q_x = - \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) muestra que el flujo en la dirección x depende en general de las tres componentes del gradiente de la carga hidráulica cuando se emplea una conductividad hidráulica anisotrópica.

3.2.1 Integración vertical de la ecuación de flujo

En el presente trabajo se utilizó un modelo bidimensional por lo que fue necesario hacer una integración en la vertical de la ecuación general de flujo arriba descrita. Para entender lo que significa ignorar la dimensión vertical, se puede hacer una revisión desde el punto de vista matemático. Partimos de la ecuación tridimensional de flujo más general para que a partir de ésta se obtenga la ecuación bidimensional de flujo.

$$\nabla \cdot q = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} - Q \quad (3.6)$$

y la ley de Darcy

$$q = -K \cdot \nabla h \quad (3.7)$$

Considerando la representación del acuífero tridimensional integrado en la vertical que se ilustra en la figura 3.2. Desarrollando la integración sobre el espesor del acuífero, se tiene:

$$\int_a^b \left(\nabla \cdot q + S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q \right) dz = 0 \quad (3.8)$$

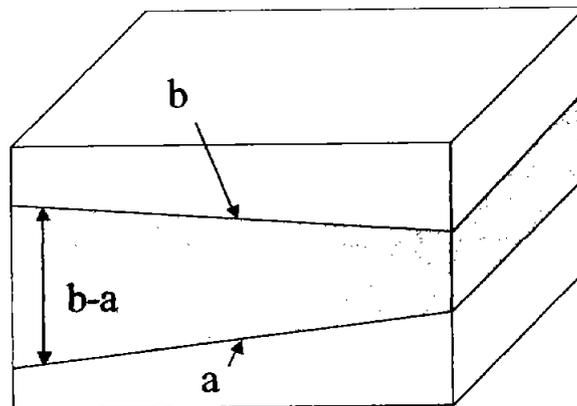


Figura 3.2. Representación del acuífero tridimensional integrado en la vertical.

donde a es el límite superior y b es la superficie más baja del acuífero. Aplicando la regla de Leibnitz para la diferencial de una integral.

$$\nabla \cdot \int_a^b q(x) dz = \int_a^b \nabla \cdot q(x) dz + q(b) \cdot \nabla b - q(a) \cdot \nabla a \quad (3.9)$$

de la ecuación 3.8 se tiene

$$\int \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial}{\partial x} \int q_x dz - q_{x|b} \frac{\partial b}{\partial x} + q_{x|a} \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int q_y dz - q_{y|b} \frac{\partial b}{\partial x} + q_{y|a} \frac{\partial a}{\partial x} + q_{z|b} \frac{\partial b}{\partial x} + q_{z|a} \frac{\partial a}{\partial x} \quad (3.10)$$

o

$$\int \nabla \cdot q dz = \nabla_{xy} \cdot \int q_{xy} dz - q_{xy|b} \cdot \nabla_{xy} b + q_{xy|a} \cdot \nabla_{xy} a + q_{z|b} - q_{z|a} \quad (3.11)$$

donde

$$\nabla_{xy}(\cdot) \equiv \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} i + \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} j$$

la diferencial que involucra el término del tiempo se trata de la misma forma, esto es:

$$S_s \int \frac{\partial h}{\partial t} dz = S_s \frac{\partial}{\partial t} \int h dz - S_s h_{|b} \frac{\partial b}{\partial t} + S_s h_{|a} \frac{\partial a}{\partial t} \quad (3.12)$$

De la forma general de la ley de Darcy, (ec. 3.7) y aplicando la regla de Leibnitz, se obtiene:

$$\int q dz = -K \cdot \int \nabla h dz \quad (3.13)$$

$$= -K \cdot \left(\nabla_{xy} \int h dz - h_{|b} \nabla_{xy} b + h_{|a} \nabla_{xy} a + h_{|b} k - h_{|a} k \right) \quad (3.14)$$

donde k es el vector unitario en la coordenada z.

De la combinación de las ecuaciones 3.10 a 3.14 y suponiendo que $h_b \cong h_a$, tenemos:

$$\begin{aligned}
 & -\nabla_{xy} \cdot K \cdot \left(\nabla_{xy} \int_a^b h dz - h_b \nabla_{xy} b + h_a \nabla_{xy} a \right) \\
 & -q_{xy|b} \cdot \nabla_{xy} b + q_{xy|a} \cdot \nabla_{xy} a + q_{z|b} + q_{z|a} \\
 & + S_s \frac{\partial}{\partial t} \int_a^b h dz - S_s h_b \frac{\partial b}{\partial t} + S_s h_a \frac{\partial a}{\partial t} + \int_a^b Q dz = 0
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Definiendo los siguientes promedios:

$$\begin{aligned}
 \bar{h} &= \frac{1}{l} \int_a^b h(x) dz \\
 \bar{Q} &= \frac{1}{l} \int_a^b Q(x) dz
 \end{aligned}$$

donde $l \equiv b - a$. Suponiendo que $h_a \cong h_b \cong \bar{h}$. Sustituyendo esta definición en la ecuación (3.15) tenemos:

$$\begin{aligned}
 & -\nabla_{xy} \cdot K \cdot \left(\nabla_{xy} l \bar{h} - \bar{h} \nabla_{xy} (b - a) \right) - q_{xy|b} \cdot \nabla_{xy} b + q_{xy|a} \cdot \nabla_{xy} a + q_{z|b} - q_{z|a} \\
 & + S_s \frac{\partial}{\partial t} l \bar{h} - S_s \bar{h} \frac{\partial}{\partial t} (b - a) + \bar{Q} l = 0
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

que, con la expansión de las derivadas se simplifica a:

$$\nabla_{xy} \cdot T_{xy} \cdot \nabla_{xy} \bar{h} = S \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} - q_{xy|b} \cdot \nabla_{xy} b + q_{xy|a} \cdot \nabla_{xy} a + q_{z|b} - q_{z|a} + \bar{Q} \tag{3.17}$$

donde el coeficiente de almacenamiento $S \equiv S_s l$ y, la transmisividad $T \equiv lK$.

Definiendo el flujo sobre la superficie del acuífero como q_T y a través del basamento como q_B , y definiendo el flujo promedio que se agrega al acuífero como $q \equiv \bar{Q}$, se obtiene:

$$\nabla_{xy} \cdot T \cdot \nabla_{xy} \bar{h} = S \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + q_T + q_B + q \quad (3.18)$$

donde $q_T = -q_{xy|b} \cdot \nabla_{xy} b + q_{z|b}$ y $q_B = q_{xy|a} \cdot \nabla_{xy} a - q_{z|a}$.

Note que la carga promedio vertical aparece en esta ecuación y la carga en la superficie y el basamento del acuífero se supone igual a esta media. Así, se puede justificar el uso de la forma bidimensional de la ecuación de flujo donde la carga promedio es una buena representación de la carga que se encuentra en el acuífero y es aproximadamente constante. En otras palabras, en la presencia de gradientes verticales significativos la forma bidimensional de la ecuación de flujo de agua subterránea no es apropiada.

3.2.2 Condición de superficie libre

El análisis anterior supone que el acuífero es confinado. Se supone ahora que el acuífero es libre, entonces es necesario añadir los siguientes cambios a la ecuación 3.18.

Se define la geometría de la superficie libre del agua (nivel freático) como: $F = F(\mathbf{x}, t)$. Se supone que una partícula sobre la superficie libre permanece sobre ésta, esto es: $DF/Dt = 0$ donde $D(\cdot)/Dt \equiv \partial(\cdot)/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla(\cdot)$ se define como la derivada substancial.

Considere la geometría de la superficie superior definida como $F = z - b(x, y, t) = 0$. Entonces de la condición de superficie libre tenemos

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{D}{Dt} (z - b) = \left(-\frac{\partial b}{\partial t} - v_{xy} \cdot \nabla_{xy} b + v_z \right) \Big|_b = 0 \quad (3.19)$$

Esta ecuación se puede interpretar como que una partícula que define la superficie libre se quedará en la superficie libre. Esto no significa que una molécula de agua no pueda pasar a través del conjunto de puntos que definen la superficie libre.

Multiplicando la ecuación 4.19 por la porosidad efectiva, θ y posteriormente restando el resultado con la ecuación 4.18, se tiene:

$$\nabla_{xy} \cdot KI(h) \cdot \nabla \bar{h} = S_s I(h) \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \theta \frac{\partial b}{\partial t} + q_T + q_B + q \quad (3.20)$$

donde $q_T = -q_{xy|b} \cdot \nabla_{xy} b + \theta v_{xy} \cdot \nabla_{xy} b + (q_z - \theta v_z)_b$ representa el flujo neto que sale del acuífero a través del nivel freático. Note que el coeficiente KI y $S_s I$ ahora están en función de la solución h , y por lo tanto la ecuación diferencial parcial es no lineal. El algoritmo de PTC utiliza un método de solución iterativa para este caso, en el que en cada paso la ecuación 3.20 se linealiza.

3.2.3 El algoritmo de solución de PTC.

Resolver la ecuación (3.1) para sistemas físicos complejos generalmente requiere aplicaciones de métodos numéricos. Para problemas de campo se requiere de un gran esfuerzo computacional para resolver la discretización numérica de estas ecuaciones tridimensionales.

El algoritmo que utiliza PTC discretiza el dominio en capas paralelas aproximadamente horizontales y dentro de cada capa se usa una discretización en elemento finito para representar dominios irregulares. Las capas se conectan verticalmente por una discretización en diferencias finitas.

Durante una iteración del tiempo dado, todos los cálculos se dividen en dos pasos. En el primer paso se resuelven todas las ecuaciones de las discretizaciones horizontales en

elemento finito independientemente unas de otras. En el segundo paso se resuelven las ecuaciones de las discretizaciones verticales que unen las capas.

3.2.4 Aproximación en elemento finito para la ecuación del flujo

En PTC la aproximación en elemento finito se formula por medio del método de Galerkin de residuos pesados. El punto de partida es una aproximación para la variable desconocida $h(\mathbf{x}, t)$, utilizando la siguiente serie finita:

$$\hat{h}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^I h(t)_i \phi(\mathbf{x})_i \quad (3.21)$$

donde $\mathbf{x} = (x, y)$ y los coeficientes h_i son función del tiempo. En PTC, las funciones base $\phi(\mathbf{x})_i$ son una función cuadrática cuando se usan elementos triangulares en la malla numérica. Por simplicidad en lo que sigue se ejemplificará la formulación de elemento finito utilizando la ecuación de flujo en dos dimensiones para acuíferos confinados.

En el método de residuos pesados el primer paso es sustituir la función de aproximación $\hat{h}(\mathbf{x}, t)$ en la ecuación de flujo (suponiendo q_T y q_B igual a cero), que es,

$$\nabla \cdot T \cdot \nabla \hat{h} - S \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} - q = R(\mathbf{x}, t) \quad (3.22)$$

donde el residuo $R(\mathbf{x}, t)$, en general, no es cero, por que la función de aproximación $\hat{h}(\mathbf{x}, t)$ no satisface exactamente a la ecuación.

El siguiente paso es pesar estos residuos $R(\mathbf{x}, t)$ por la función base $\phi(\mathbf{x})_i$, e igualar la integral de este producto a cero, esto es,

$$\int_{\Omega} R(\mathbf{x}, t) \phi(\mathbf{x})_i d\Omega = 0, \quad i = 1, \dots, I. \quad (3.23)$$

Sustituyendo $R(\mathbf{x}, t)$ por el lado izquierdo de la ecuación 3.22, se obtiene

$$\int_{\Omega} \left(\nabla \cdot T \cdot \nabla h - S \frac{\partial h}{\partial t} - q \right) \cdot \phi(\mathbf{x})_i d\Omega = 0, \quad i = 1, \dots, I. \quad (3.24)$$

El siguiente paso en el desarrollo es aplicar el teorema de Green (integración por partes en varias dimensiones) a la ecuación 3.24. Esto da:

$$\int_{\Omega} \left[(-T \cdot \nabla h) \cdot \nabla \phi(\mathbf{x})_i - \left(S \frac{\partial h}{\partial t} + q \right) \phi(\mathbf{x})_i \right] d\Omega + \int_{\partial\Omega} T \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \phi(\mathbf{x})_i dl = 0, \quad i = 1, \dots, I. \quad (3.25)$$

Note que en la ecuación 3.25 un nuevo término, el último término del primer miembro de esta ecuación, se ha introducido vía el teorema de Green, que es una integral sobre la frontera de la región Ω . Este término tiene la forma de un término de flujo a través de la frontera. Cuando este término es necesario, se conocerá (o se puede evaluar) como una condición de frontera del tipo 2 (Neumann o flujo). Para entender cómo se hace, procedamos un poco en el desarrollo de elemento finito por sustitución de

$h(\mathbf{x}, t) = \sum_{j=1}^J h(t)_j \phi(\mathbf{x})_j$ en la ecuación 3.25. Se obtiene:

$$\int_{\Omega} \left\{ \left[-T \cdot \nabla \sum_{j=1}^J h(t)_j \phi(\mathbf{x})_j \right] \cdot \nabla \phi(\mathbf{x})_i - \left[S \frac{\partial \sum_{j=1}^J h(t)_j \phi(\mathbf{x})_j}{\partial t} + q \right] \phi(\mathbf{x})_i \right\} d\Omega + \int_{\partial\Omega} T \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \phi(\mathbf{x})_i dl = 0, \quad i = 1, \dots, I. \quad (3.26)$$

Se puede ver que la ecuación 3.26 representa I ecuaciones. Se utiliza ahora una representación en diferencias finitas para la derivada del tiempo $\partial h(\mathbf{x}, t)/\partial t$. Se obtiene:

$$\left. \frac{\partial h(t_{n+1})}{\partial t} \right|_{x_i} = \frac{h_{n+1} - h_n}{\Delta t} \Big|_{x_i} + O(\Delta t) \quad (3.27)$$

y sustituyendo en la ecuación 3.26, se tiene:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left\{ \left[-T \cdot \nabla \sum_{j=1}^J h_{n+1,j} \phi(x)_j \right] \cdot \nabla \phi(x)_i, \right. \\ & \left. - \left[S \sum_{j=1}^J \frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t} \phi(x)_j + q \right] \phi(x)_i \right\} d\Omega \\ & + \int_{\partial\Omega} T \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \phi(x)_i dl = 0, \quad i = 1, \dots, I. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Ahora se tienen I ecuaciones algebraicas con J incógnitas. Así, se impone la condición de que $I = J$, para que sea posible resolver la ecuación 3.28 para las J incógnitas con valores de h_{n+1} en cada paso de tiempo.

Para ilustrar el proceso de integración se reducirá el problema a una dimensión. Así, de la ecuación 3.28 se tiene:

$$\begin{aligned} & \int \left[\left(-T \frac{d}{dx} \sum_{j=1}^J h_{n+1,j} \phi(x)_j \right) \frac{d}{dx} \phi(x)_i - \left(S \sum_{j=1}^J \frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t} \phi(x)_j + q \right) \phi(x)_i \right] dx \\ & + T \frac{\partial h}{\partial n} \phi(x)_i \Big|_{x_0}^{x_1} = 0, \quad i = 1, \dots, I. \end{aligned} \quad (3.29)$$

para proceder además es útil considerar una forma específica para las funciones bases $\phi(x)_j$. A pesar de que en PTC se utilizan funciones cuadráticas, aquí se ilustrará el proceso con las funciones lineales debido a que los cálculos con estas últimas son más simples. La

figura 3.3 muestra las funciones base lineales.

La forma de esas funciones son:

$$\phi(x)_i = \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad (3.30)$$

$$\phi(x)_i = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad (3.31)$$

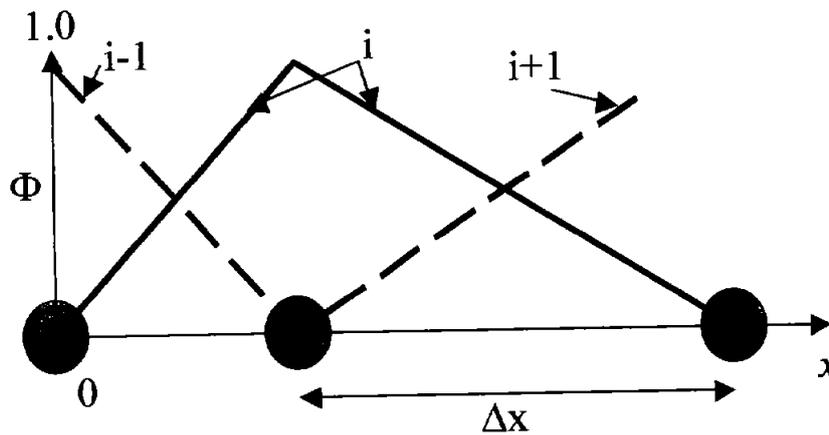


Figura 3.3. Funciones base lineales.

Con esta estructura en mente, es evidente que la integral en la ecuación 3.29 está formada por integrales por tramos. Así se puede reescribir dicha ecuación como:

$$\sum_{e=1}^E \int \left[-T \frac{d}{dx} \sum_{j=1}^J h_{n+1,j} \phi(x)_j \right] \frac{d}{dx} \phi(x)_i - \left[S \sum_{j=1}^J \frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t} \phi(x)_j + q \right] \phi(x)_i + T \frac{\partial h}{\partial n} \phi(x)_i \Big|_{x_0}^{x_1} = 0, \quad i = 1, \dots, I. \quad (3.32)$$

Se observa ahora que la integral típica es de la forma

$$\begin{aligned}
 & -T_e \cdot \int \left[\frac{d}{dx} \sum_{j=1}^J h_{n+1,j} \phi(x)_j \right] \frac{d}{dx} \phi(x)_i dx \\
 & -S_e \int \left[\sum_{j=1}^J \frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t} \phi(x)_j + q \right] \phi(x)_i dx \quad i = 1, \dots, I.
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

Donde los parámetros T y S se suponen constantes sobre cada elemento e .

3.3 Discretización espacial y temporal

La discretización espacial se realizó mediante la ayuda del software Argus One (Argus Interware, 1997). Argus ONE es un programa para crear mallas en elemento finito o diferencias finitas en forma gráfica. Argus ONE tiene un conjunto de utilerías que permiten importar mapas digitalizados, extraer líneas de dominios y generar automáticamente mallas sobre un dominio dado, permite además asignar diferentes variables para la malla en una forma global o para elementos o nodos particulares, tales como valores para las condiciones de frontera, condiciones iniciales, conductividades hidráulicas, coeficientes de almacenamiento, concentraciones, pozos de extracción, etc. Esta asignación se hace por medio de capas. Finalmente los datos configurados en Argus ONE se pueden exportar en formatos apropiados para cualquier código numérico, ya que Argus ONE tiene incorporado un lenguaje para exportar sus datos. En el ambiente Argus ONE se ha desarrollado una interfaz gráfica para PTC, que permite al usuario definir el problema de flujo y contaminación del agua subterránea para ser resuelto con PTC, utilizando únicamente herramientas construidas dentro de Argus ONE. La interfaz gráfica además configura un proyecto para importar los resultados de PTC dentro de Argus ONE para su post-procesamiento (Olivares, 2001).

Se definió una malla triangular que en las zonas con mayor densidad de pozos es más refinada. La malla consta de 5212 nodos y 10,082 elementos con un ancho de banda óptimo de 116. En la figura 3.4 se presenta la malla en elemento finito del modelo.

Se utilizó un modelo de una sola capa. El límite inferior de la capa se definió considerando las secciones geológicas que presenta la empresa Guysa, en donde se aprecia la profundidad del basamento del acuífero y el límite superior de la capa se definió con base en las elevaciones topográficas. Las elevaciones topográficas se obtuvieron de una base de datos de elevaciones topográficas proporcionada por la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro. En las figuras 3.5 y 3.6 se muestran secciones del modelo en donde se aprecia el espesor de la capa.

Con la información disponible se definieron los periodos a simular (tabla 3.1). La calibración se realizó en estado transitorio ya que no se tiene la información suficiente para el estado permanente.

Tabla 3.1 Periodos de simulación.

Periodo	Inicia día	Termina día	Total de días
Ago 1981 – ago 1985	1	1460	1460
Ago 1985 – ago 1990	1461	3285	1825
Ago 1990 – dic 1993	3286	4502	1217
Dic 1993 – dic 1995	4503	5232	730
Dic 1995 – dic 1999	5233	6692	1460

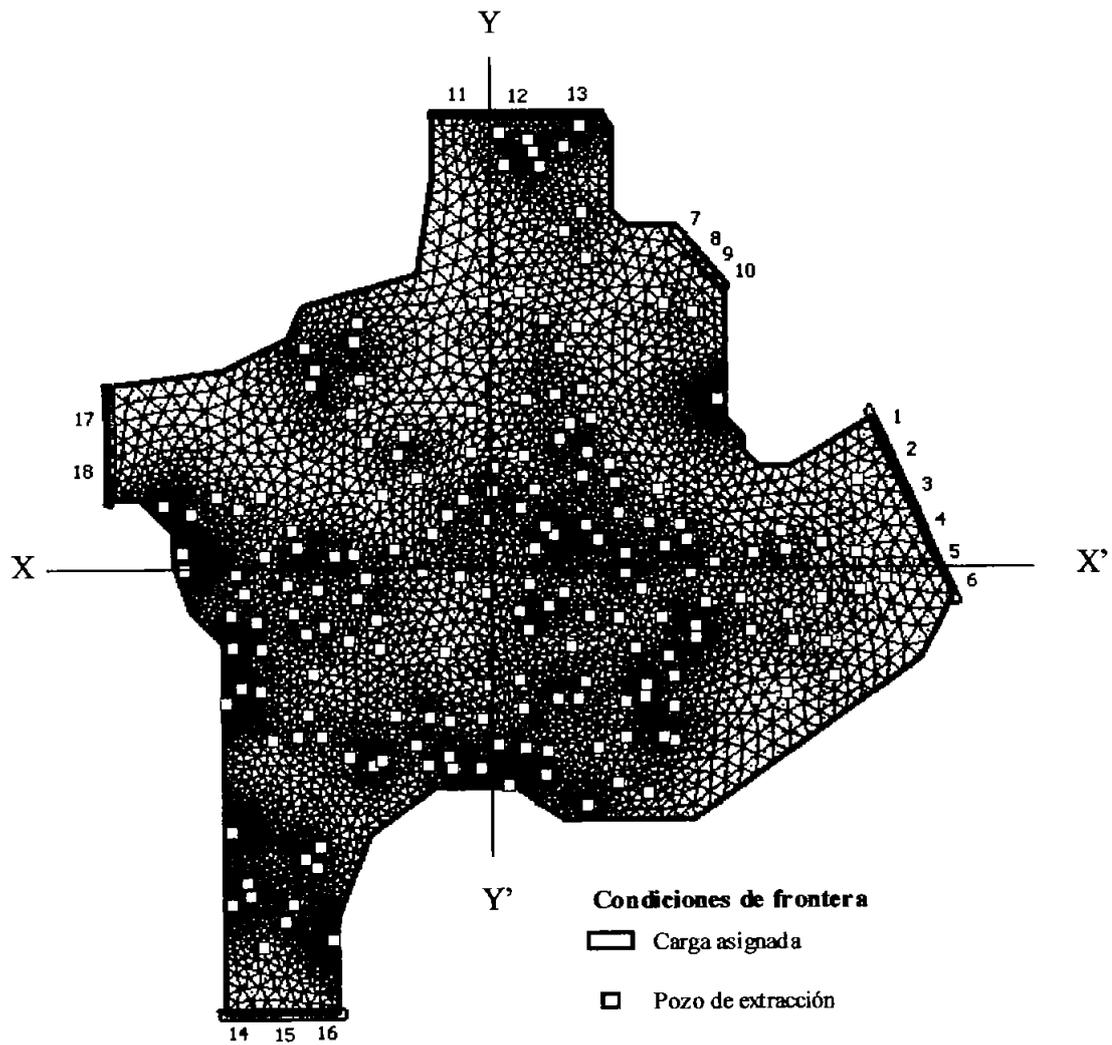


Figura 3.4. Malla en elemento finito y condiciones de frontera del modelo.

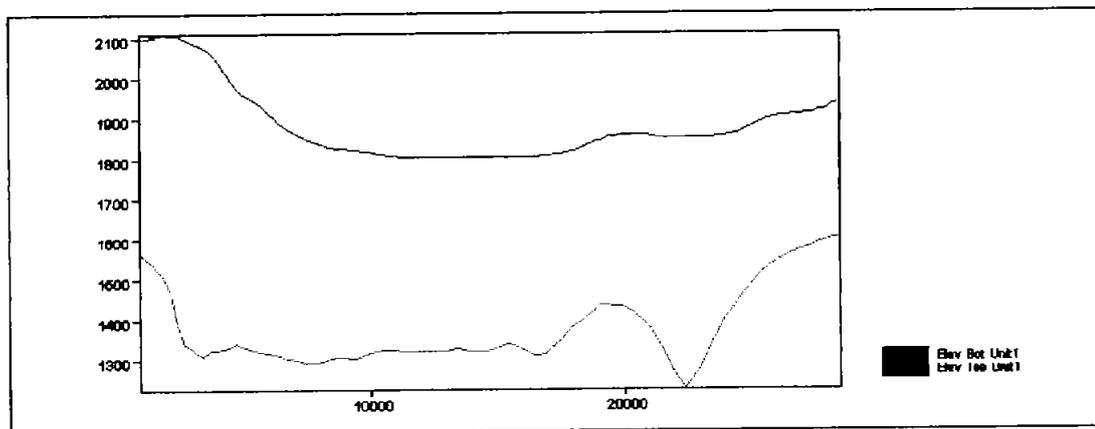


Figura 3.5 Sección X-X'.

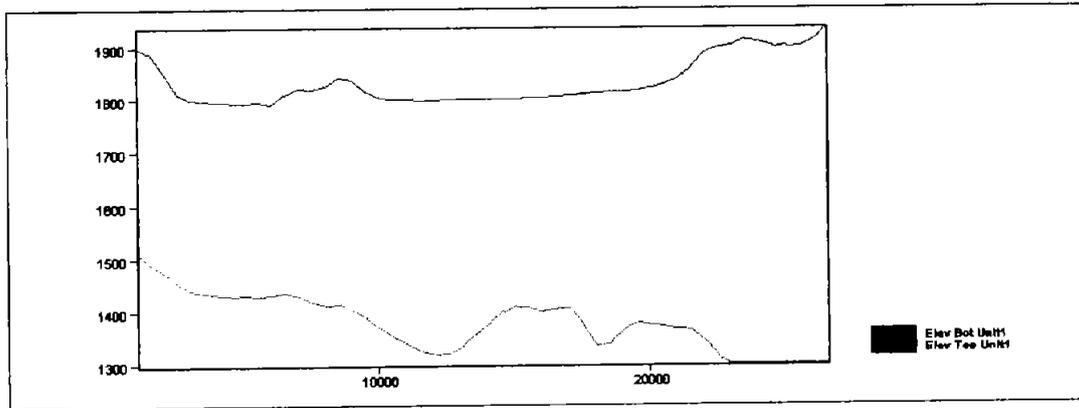


Figura 3.6 Sección Y-Y'.

3.4 Definición de las condiciones iniciales y de frontera del modelo

Los modelos numéricos resuelven la ecuación general de flujo de aguas subterráneas utilizando condiciones de frontera y condiciones iniciales específicas. Para la condición inicial de la simulación del modelo se tomó la elevación de los niveles estáticos del año de 1981.

Las condiciones de frontera se definieron tomando en cuenta el marco conceptual del funcionamiento hidrogeológico. Se utilizaron fronteras de carga asignada y de flujo asignado. En las zonas de recarga y descarga del modelo se asignaron fronteras de carga asignada, pero con un valor diferente para cada periodo (ver tabla 3.2). El valor de la carga asignada depende del nivel estático que se tiene en la zona de la frontera para cada uno de los periodos de modelación. En el resto de la frontera no se tiene flujo.

Como se mencionó antes, la empresa Guysa realizó una reconstrucción del bombeo del valle de Querétaro de 1938 a 1996 (Guysa, 96), los volúmenes de extracción del modelo se asignaron tomando en cuenta esta reconstrucción. En la tabla 5 del Anexo I se tiene el caudal de extracción para cada uno de los periodos asignados al modelo.

Tabla 3.2. Cargas asignadas a las condiciones de frontera del tipo I.

No. Frontera*	Periodo 1 m.s.n.m.	Periodo 2 m.s.n.m.	Periodo 3 m.s.n.m.	Periodo 4 m.s.n.m.	Periodo 5 m.s.n.m.
1	1843	1834	1828.5	1827.5	1823
2	1835	1821	1815	1812.5	1806
3	1835	1822	1814.15	1811.5	1805.5
4	1833	1820.5	1811	1806.5	1800.5
5	1827.5	1813.5	1801	1795	1789.5
6	1820	1804.5	1790.5	1783.5	1778
7	1878.35	1876.1	1875	1874.5	1873.5
8	1878.75	1876.75	1876	1875.5	1874.75
9	1875.39	1873	1873	1873	1872.5
10	1871.6	1866.5	1866.5	1866.5	1866.5
11	1906	1900	1894.5	1891	1888
12	1906.5	1900.75	1895	1892	1888.5
13	1907.5	1901.5	1896	1893	1889
14	1847.5	1842	1835	1830.5	1827
15	1847	1840.5	1833	1828	1823
16	1846	1837.5	1830	1825.5	1820.5
17	1735.5	1723.75	1714.25	1706	1698.25
18	1733.35	1722.25	1711.75	1705	1696.5

* Misma numeración que se muestra en la figura 3.4.

3.5 Asignación de los parámetros del modelo

Para asignar los parámetros del modelo se realizó un análisis de la información disponible. A continuación se resume el criterio utilizado para la asignación de los parámetros de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y recarga vertical.

3.5.1 Conductividad hidráulica

Para asignar el parámetro de la conductividad hidráulica al modelo se tomaron las 18 pruebas de bombeo interpretadas por la empresa Guysa en el estudio de 1996 (ver tabla 1 anexo 1). Para la zona de Obrajuelo se tenían datos de la transmisividad y se hizo una estimación de la conductividad hidráulica. Estos datos no se asignaron inicialmente al modelo debido a que los valores de conductividad hidráulica estaban relativamente altos con respecto a los valores interpretados por Guysa para el acuífero de Obrajuelo, pero sí se conservaron para considerarlos durante el proceso de calibración. La tabla 3.3 presenta los datos de la transmisividad para la zona de Obrajuelo.

Con los datos de conductividad hidráulica de la tabla 1 anexo I se hizo una distribución de la conductividad hidráulicas por zonas de igual conductividad para introducir los datos al modelo. En la figura 3.7 se muestran la zonificación inicial para la conductividad hidráulica.

Tabla 3.3. Datos de la transmisividad para la zona de Obrajuelo.

Pozo	Long	Latitud	T m ² /s	Prof. Total (m)	Prof. N.E. (m)	Esp b (m)	K (m/d)	Fuente
3	344,185	2,276,238	0.0019	153	98.6	54.4	3.0	Lesser, 1995
86	340,425	2,275,440	0.015	200	86.3	113.7	11.4	Ingeniería computarizada, 1998
205	339,710	2,269,746	0.0061	180	67.9	112.1	4.7	Lesser, 1995
214	340,094	2,268,033	0.015	150	45.56	104.44	12.4	Ingeniería computarizada, 1998

3.5.2 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre es equivalente al rendimiento específico (S_y) o porosidad efectiva (n_e). Éste varía de 1 % a 30 % (Spitz y Moreno, 1996). El coeficiente de almacenamiento de entrada para el modelo se definió con base en la

litología y tomando en cuenta el valor del rendimiento específico estimado en el balance de masa. Para la zona de medio poroso se asignó un coeficiente de almacenamiento de 0.10 y para la zona de medio fracturado (zona de montañas) de 0.08. Los coeficientes de almacenamiento son bajos debido a los potentes depósitos de arcilla que rellenan la cuenca del valle de Querétaro y que inhiben el paso de agua en el subsuelo.

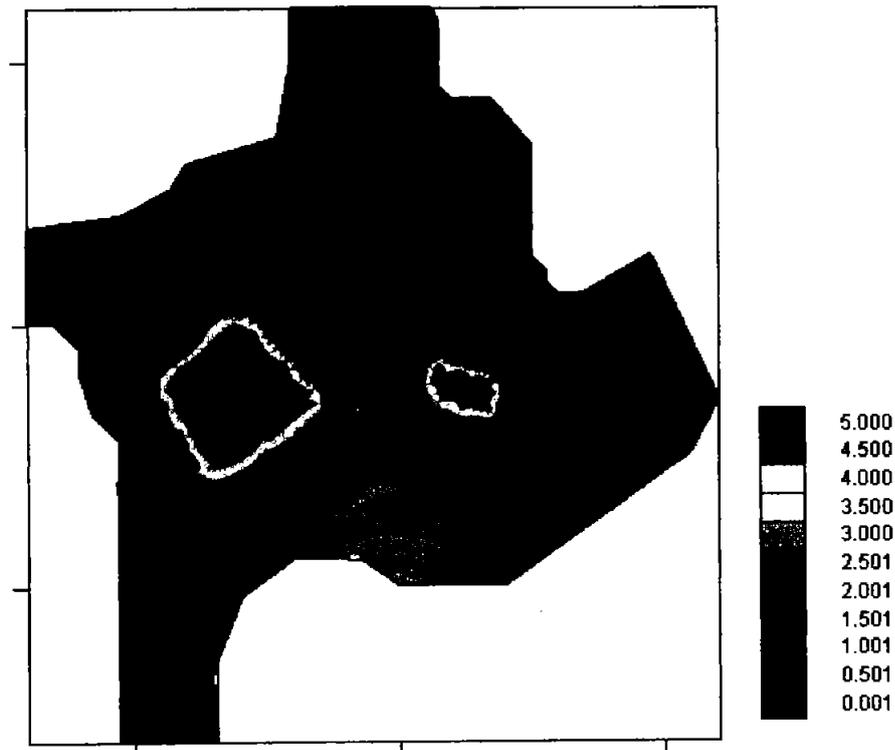


Figura 3.7. Conductividad hidráulica (m/día) de entrada al modelo.

3.5.3 Recarga vertical

La recarga vertical natural se asignó de acuerdo a los porcentajes de recarga obtenidos por el método de los cloruros (CEA-UAQ, 2002) [ver anexo IV] y a la lámina de precipitación media que se tiene para cada uno de los periodos. La figura 3.8 muestra los porcentajes de infiltración de la precipitación obtenido por el método de los cloruros y se observa que este no es constante en el área de estudio. En la tabla 3.4 se presenta la lámina de recarga natural asignada al modelo para cada periodo de acuerdo con los porcentajes mostrados en la figura 3.8. La recarga vertical inducida (retornos de riego y fugas en la red de agua potable) se

asignó considerando el coeficiente de infiltración estimado en el balance de masa y se supuso constante para todos los periodos de modelación. La figura 3.9 muestra las zonas de retorno por riego y la lámina de recarga asignada al modelo.

Tabla 3.4. Lámina de recarga natural asignada al modelo de acuerdo con las zonas presentadas en la figura 3.8.

Zona	Lámina (m/día)				
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
2%	0.00003007	0.00002685	0.00003562	0.00003123	0.00002740
4%	0.00006014	0.00005370	0.00007123	0.00006247	0.00005479
5%	0.00007518	0.00006712	0.00008904	0.00007808	0.00006849
11%	0.00016539	0.00006548	0.00019589	0.00017178	0.00015068
12%	0.00018043	0.00016110	0.00021370	0.00018740	0.00016438

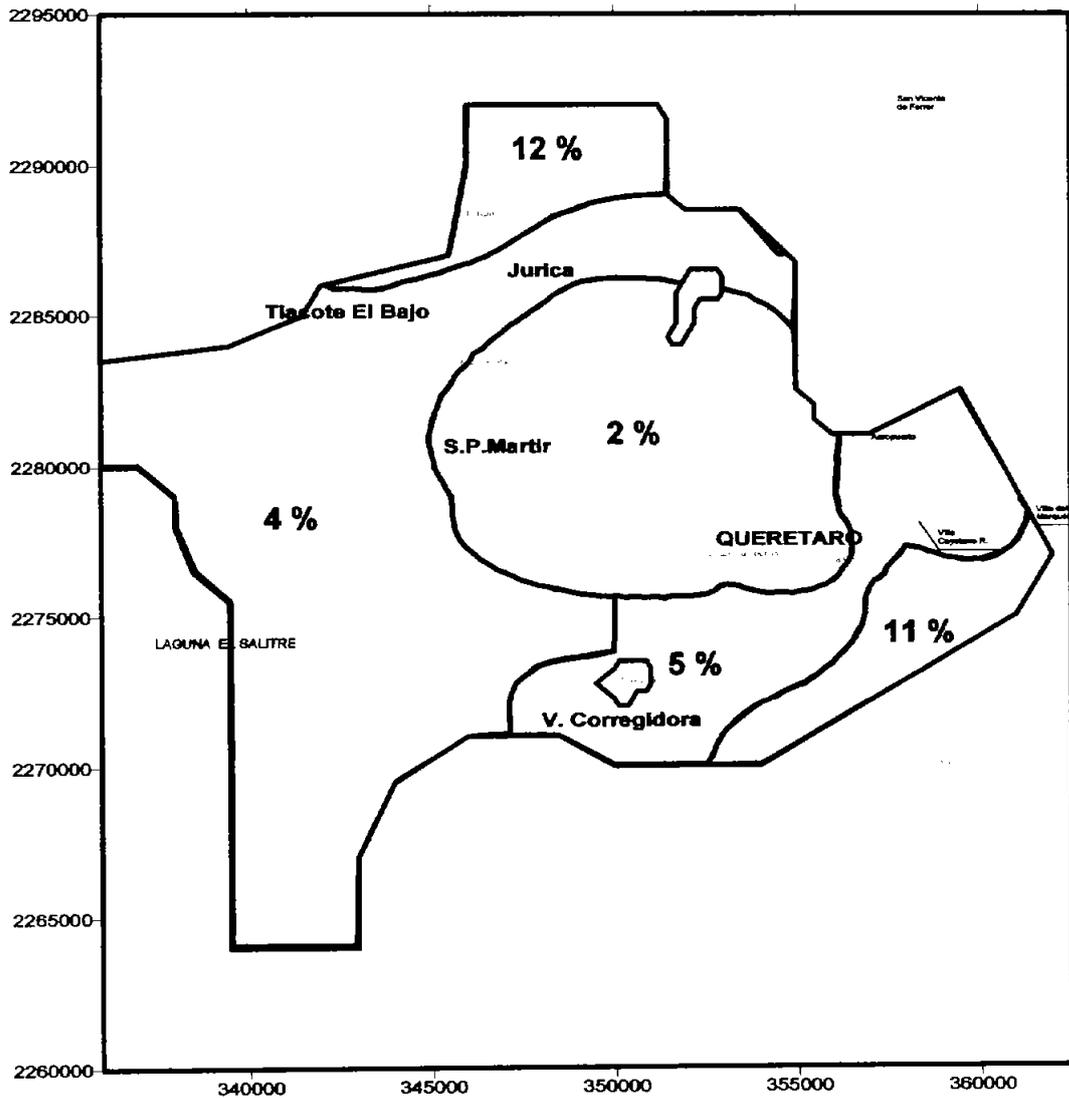


Figura 3.8. Porcentaje de recarga por lluvia estimado por el método de los cloruros.

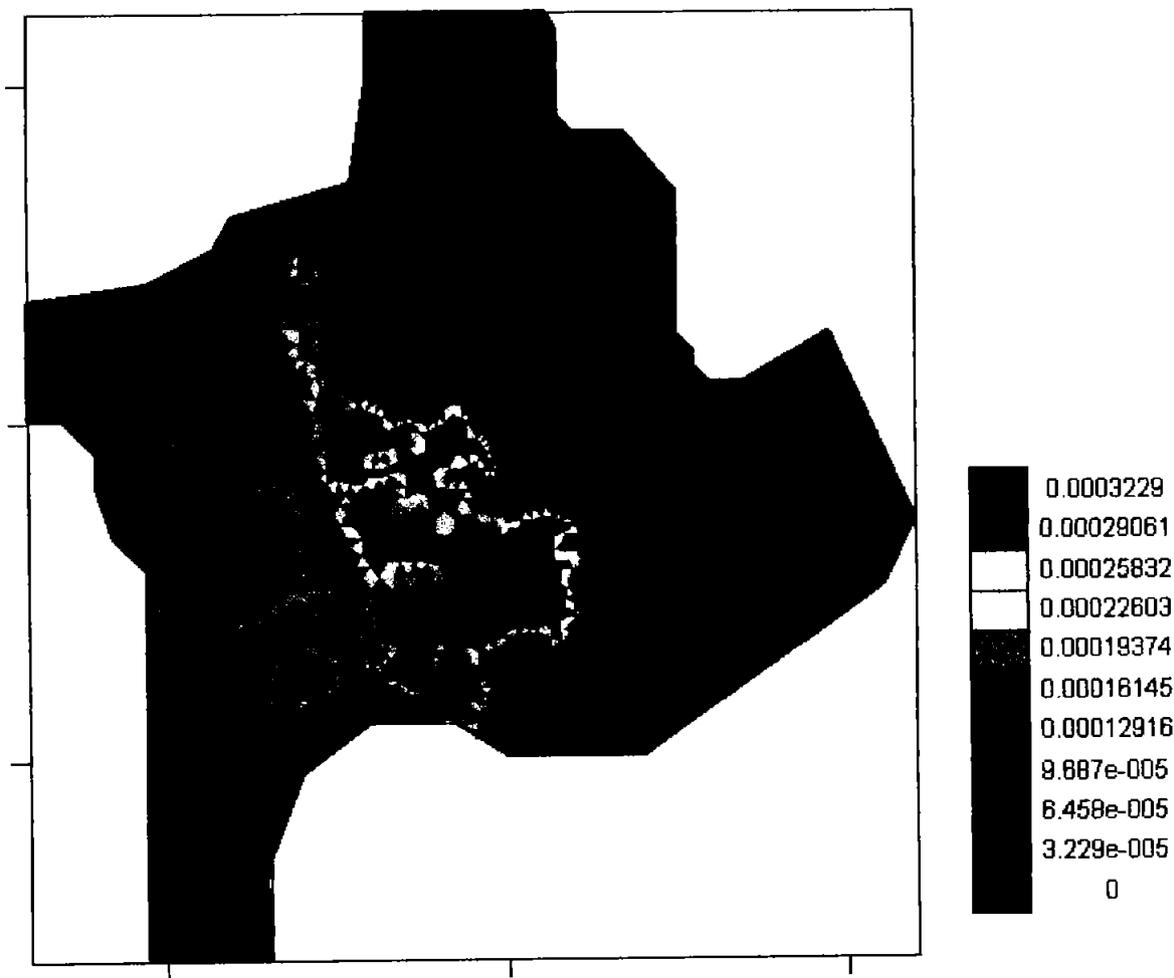


Figura 3.9. Lámina de retorno por riego y fugas de la red de agua potable en m/día asignada al modelo.

3.6 Calibración del modelo

El proceso de calibración del modelo se logra ajustando una distribución de los parámetros, condiciones de frontera y periodos que producen flujo y cargas simuladas que se comparan con valores de campo medidos dentro de un rango de error preestablecido. Por lo anterior, es necesario evaluar los valores de las cargas y de los flujos u otros datos de la calibración, así como los parámetros estimados que serán usados en el proceso de calibración.

En el caso del acuífero del valle de Querétaro se considera que existe información suficiente como para garantizar resultados que se aproximen a la realidad. Como parte de la

información recopilada se tienen datos de piezometría a partir del año de 1970, con los que se hicieron esquemas de elevación del nivel estático para los años de 1981, 1985, 1990, 1993, 1995 y 1999, ya que para estos años se tiene un mayor número de pozos con datos de elevación del nivel estático.

Con respecto a la extracción del agua subterránea el factor de mayor incertidumbre es la reconstrucción del bombeo para el periodo que comprende de 1981 a 1985, y la más confiable de 1990 en adelante ya que se cuenta con información particularizada acerca del régimen de operación de cada uno de los pozos para cada año así como de sus caudales instantáneos. Como se comentó antes, la reconstrucción del bombeo de Guysa únicamente abarca hasta el año de 1996, y no se cuenta con datos posteriores por lo que para el periodo 95-99 se supuso que el bombeo era constante, es decir que se continuó extrayendo agua al acuífero de acuerdo al régimen de operación del año de 1996. Este supuesto se hizo con base a una sugerencia de la CEAQ, que de acuerdo con sus datos el acuífero sigue explotándose aproximadamente con la misma tasa de bombeo. Para antes de 1985 el bombeo del valle de Querétaro se considera prácticamente desconocido, aunque, como se mencionó antes, la empresa Guysa realizó un intento de la reconstrucción del bombeo (Guysa, 1996).

Para el acuífero del valle de Querétaro no fue posible modelar para la condición en estado permanente debido a que no se tienen datos de los niveles estáticos que representen el flujo en su estado original y por otro lado se carece de información hidrométrica confiable. Por este motivo el modelo se calibró en estado transitorio a partir de 1981 utilizando cinco periodos de simulación: 1981-1985, 1985-1990, 1990-1993, 1993-1995 y 1995-1999. El procedimiento de calibración fue a prueba y error y la carga inicial utilizada es el esquema de 1981. El método de calibración a prueba y error es el proceso de cambiar un dato de entrada al modelo, corriendo el programa del modelo con la nueva entrada, y entonces comparar los resultados de la simulación con los objetivos de calibración. Si los valores calculados de carga y tasa de flujo de agua subterránea se comparan favorablemente con los valores medidos, entonces el modelo se ha calibrado. Si no, el proceso se repite (ASTM, 1996).

En la calibración a prueba y error, se asignaron los valores de los parámetros iniciales a cada nodo o elemento en la malla. Durante la calibración los valores de los parámetros se ajustaron en corridas secuenciales del modelo para igualar las cargas simuladas con los objetivos de calibración. Para el modelo los parámetros con los que se calibraron fueron la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento.

Con respecto a las conductividades hidráulicas, éstas se cargaron al modelo partiendo de los datos que se tomaron de las reinterpretaciones de pruebas de bombeo del estudio de Guysa, (1996). Los valores puntuales sirvieron para asignar a una determinada área el mismo comportamiento. Este parámetro fue modificado dentro de los rangos del medio tanto en valor como en el espacio en la medida que la tendencia calculada se aproximaba a la observada.

Se calibró para los periodos 81-85, 85-90 y 90-93, primeramente ajustando los datos de conductividad hidráulica y posteriormente se ajustaron los datos de almacenamiento. En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran los valores calibrados de la conductividad hidráulica y del rendimiento específico respectivamente. Los periodos de 93-95 y 95-99 se utilizaron para verificar el modelo.

Por otro lado, es importante mencionar que de todos los parámetros de entrada al modelo, los volúmenes de explotación fueron los únicos sin modificar, es decir, se está dando por hecho que la reconstrucción del bombeo realizada por la empresa Guysa, (1996), es válida ya que es la única información disponible que se tiene..

La medida del error para los periodos de calibración y verificación fue la estimación del error cuadrático medio. Además se hicieron planos con la distribución espacial de los errores, gráficas de datos observados contra datos simulados y gráficas de los datos observados y simulados contra tiempo.

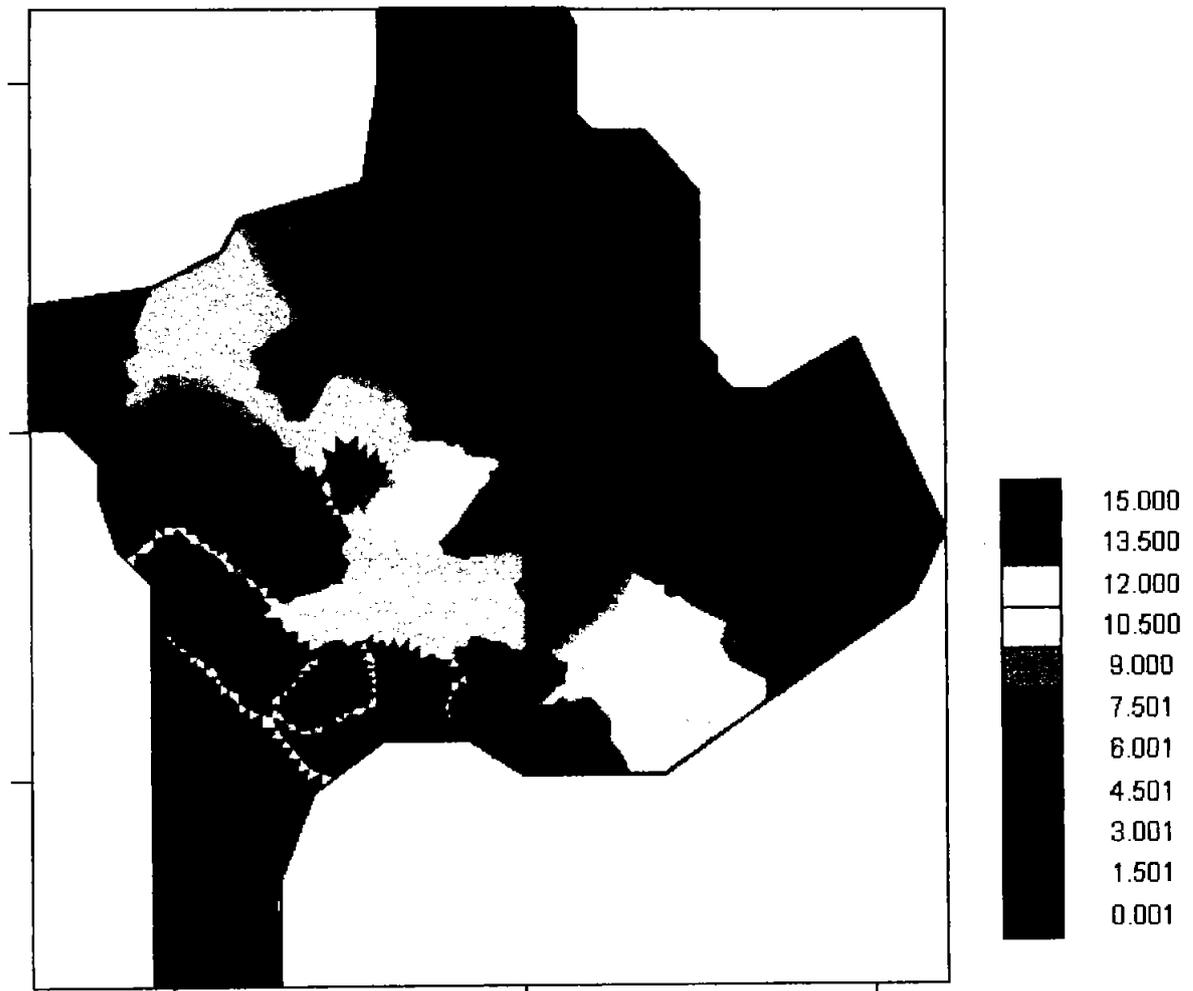


Figura 3.10 Valores calibrados de la conductividad hidráulica en m/día.

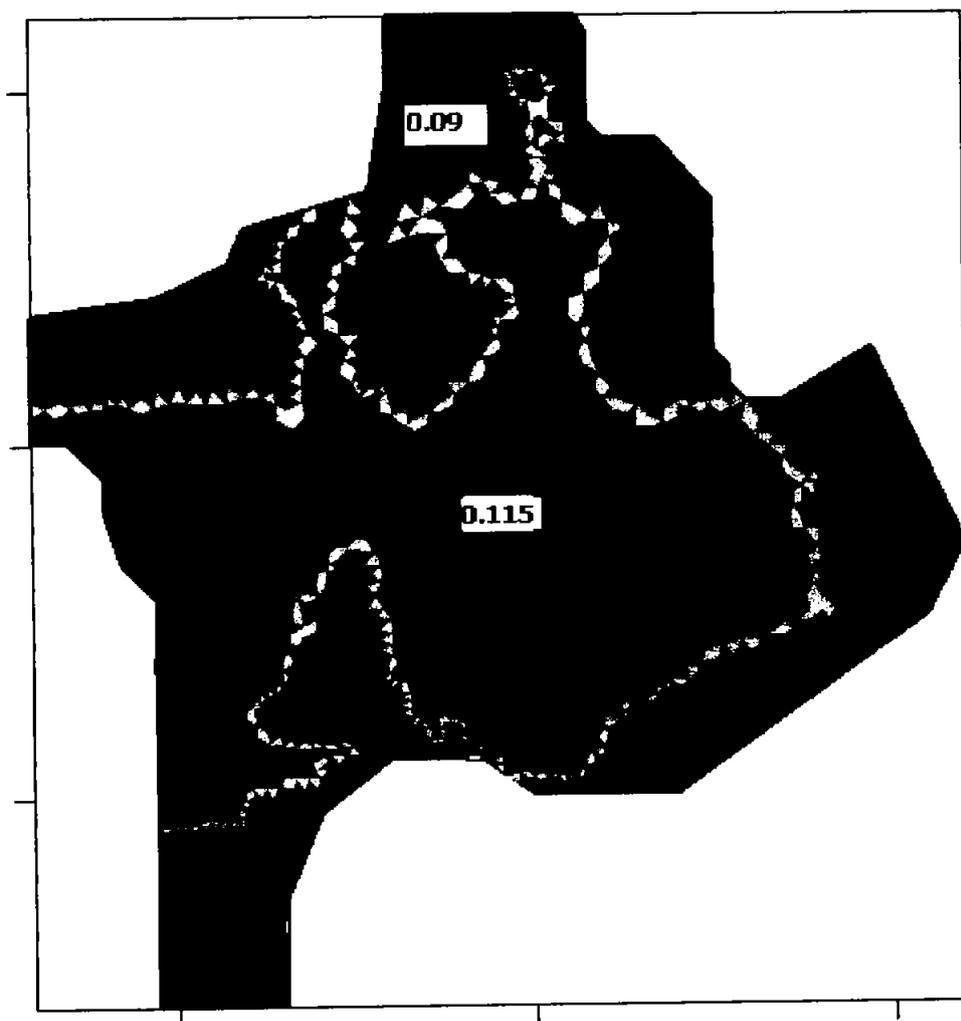


Figura 3.11 Valores calibrados del rendimiento específico.

Los errores cuadráticos medios que se obtuvieron para los periodos de calibración son los siguientes:

Periodo 81-85	5.9 m
Periodo 85-90	6.2 m
Periodo 90-93	4.6 m

Y para los años de verificación del modelo se obtuvieron los errores siguientes:

Periodo 93-95	4.2 m
---------------	-------

Periodo 95-99 6.2 m

Los errores anteriores no pudieron reducirse, debido a las grandes fluctuaciones que se tiene en los niveles en algunas zonas del acuífero en estudio, esto puede apreciarse en la distribución espacial de los errores que se presentan en las figuras 3.12 a la 3.14 para los años 93, 95 y 99 (años de calibración y verificación). En estas figuras se observan pozos con errores altos muy cercanos a pozos con errores muy bajos lo que complica un poco la calibración de los parámetros ya que al disminuir el error en alguno de los pozos se afecta directamente al otro.

En las gráficas de datos observados contra datos simulados (figuras 3.15 a 3.117) se observa que los datos tienden a ajustarse a una línea de 45° que pasa por el origen, teniéndose un equilibrio entre los datos que están por arriba de esa línea y los que quedan por debajo, lo cual indica que no se tiene sobreestimación o subestimación en la calibración.

Las gráficas de datos simulados y datos observados contra tiempo muestran en general que el comportamiento de los datos simulados siguen la misma tendencia en el tiempo de los datos observados. En las figuras 3.18 a la 3.22 se observan las gráficas de datos observados y simulados contra tiempo de pozos representativos de la zona modelada (en el Anexo VI se presentan las gráficas de los pozos con tres o más datos observados).

Por otro lado se realizaron también las configuraciones piezométricas de los resultados simulados, y se observa en general que éstas mantienen el mismo comportamiento que se observan en las configuraciones realizadas con los datos observados del nivel estático mostradas con anterioridad. En las figuras 3.23 a 3.27 se muestran las configuraciones piezométricas simuladas.

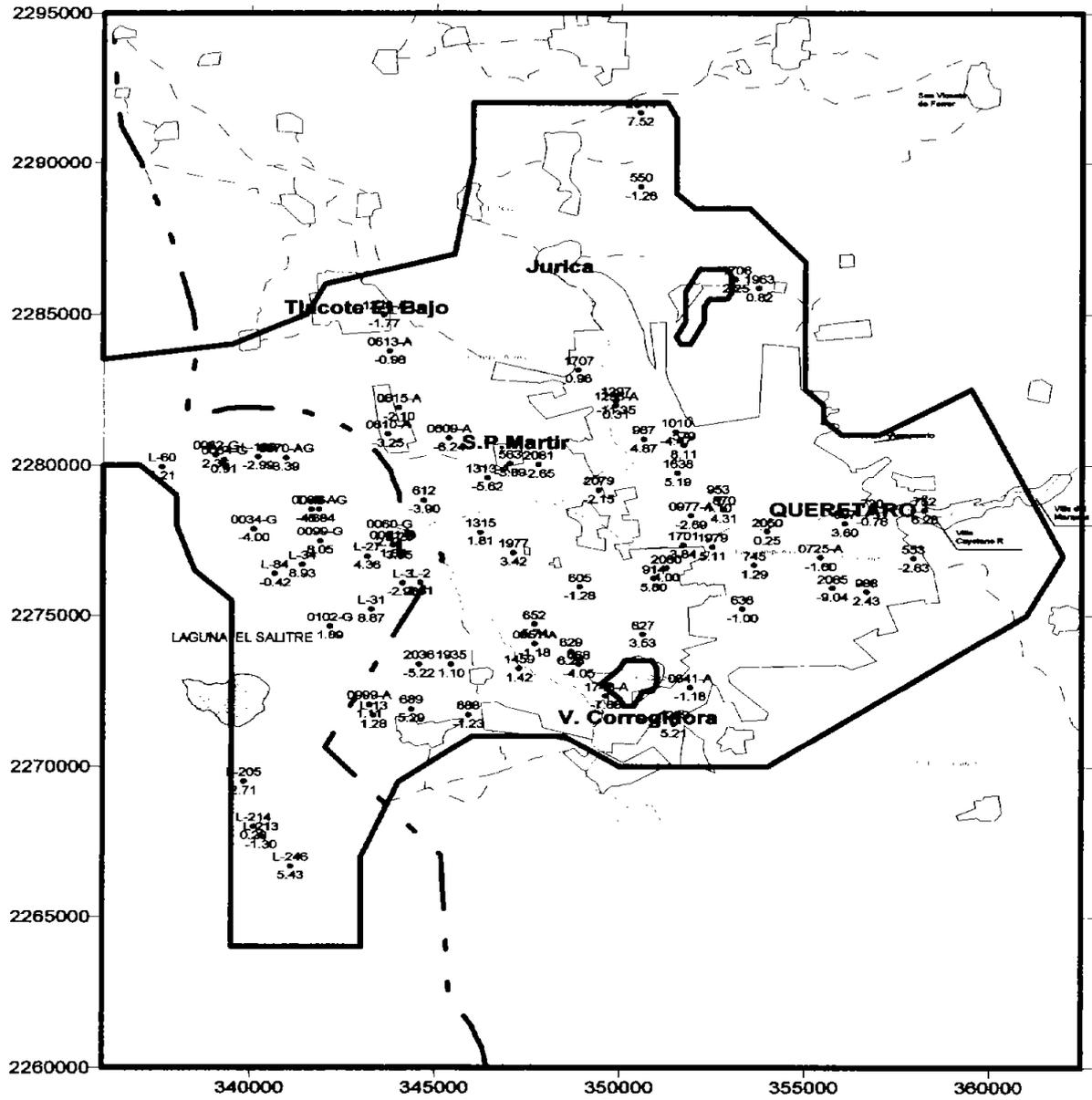


Figura 3.13. Distribución espacial de los errores para el año de 1995 (m).

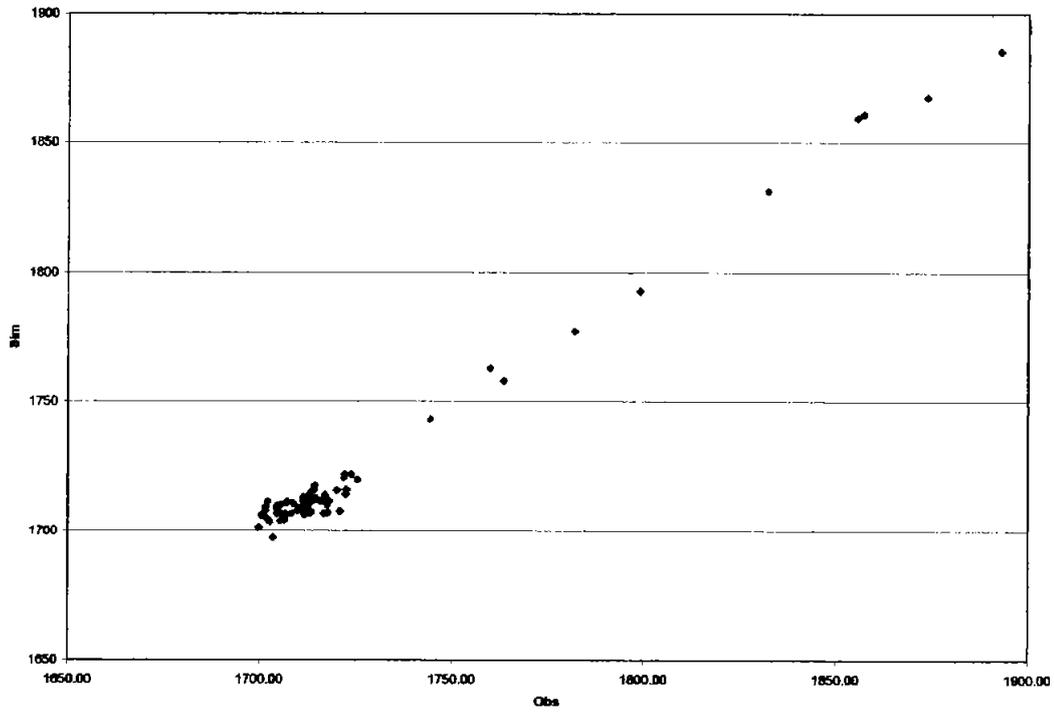


Figura 3.15. Datos observados vs datos simulados para 1993.

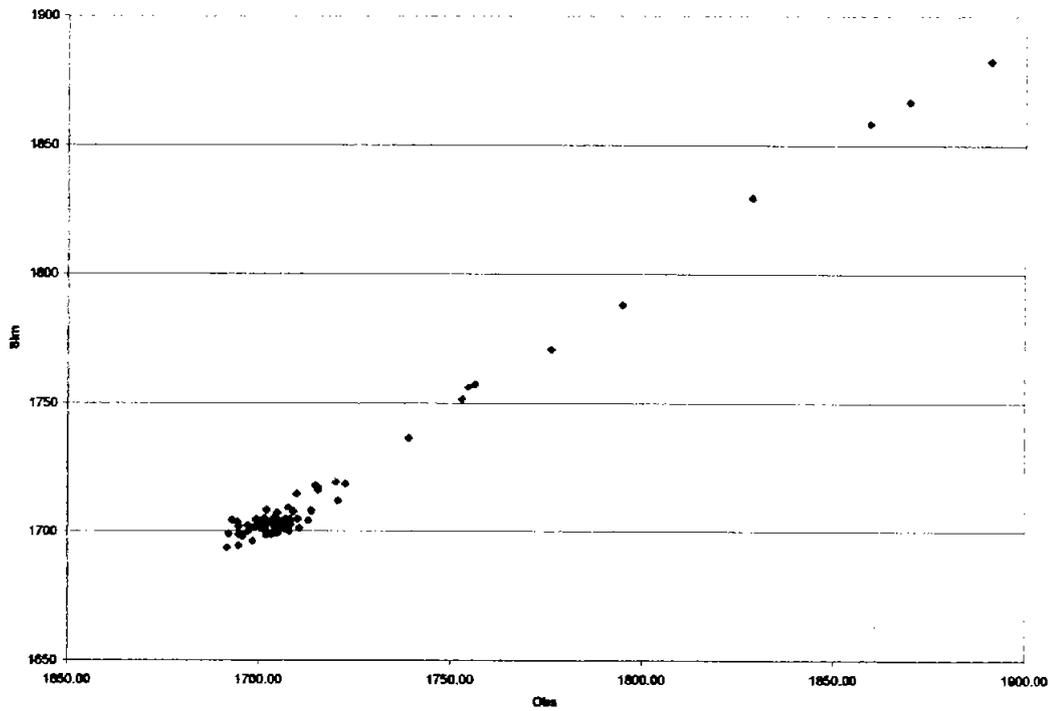


Figura 3.16. Datos observados vs datos simulados para 1995.

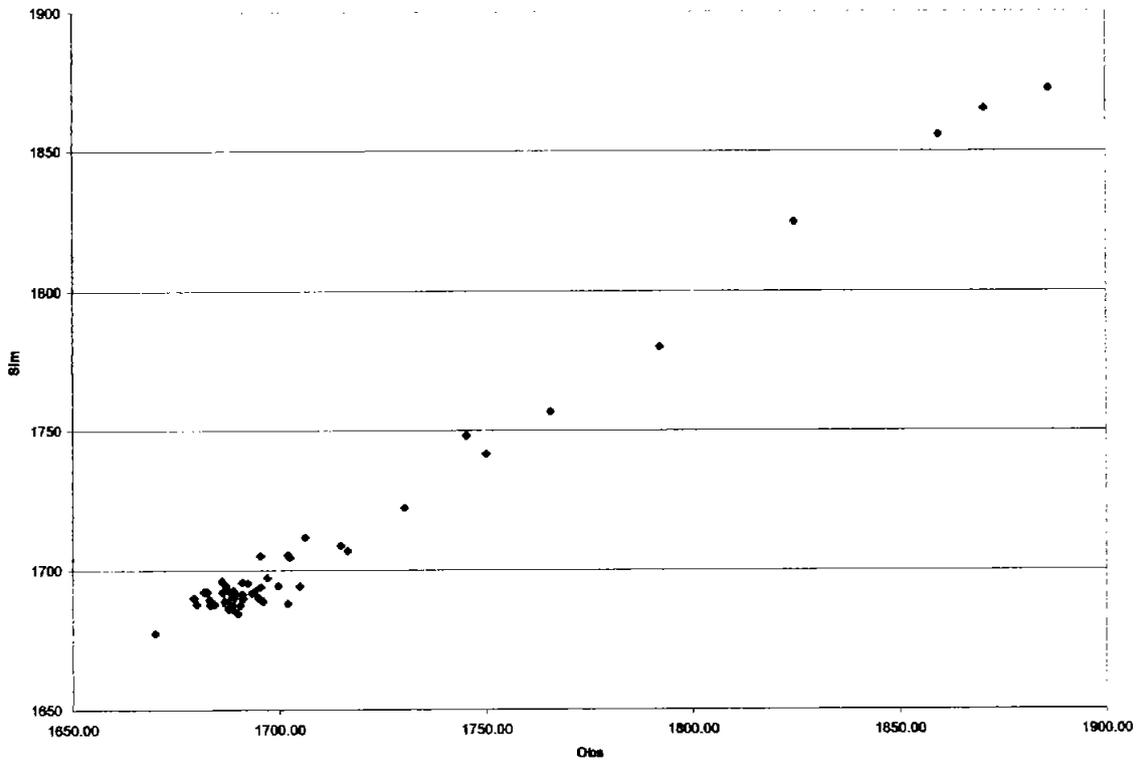


Figura 3.17. Datos observados vs datos simulados para 1999.

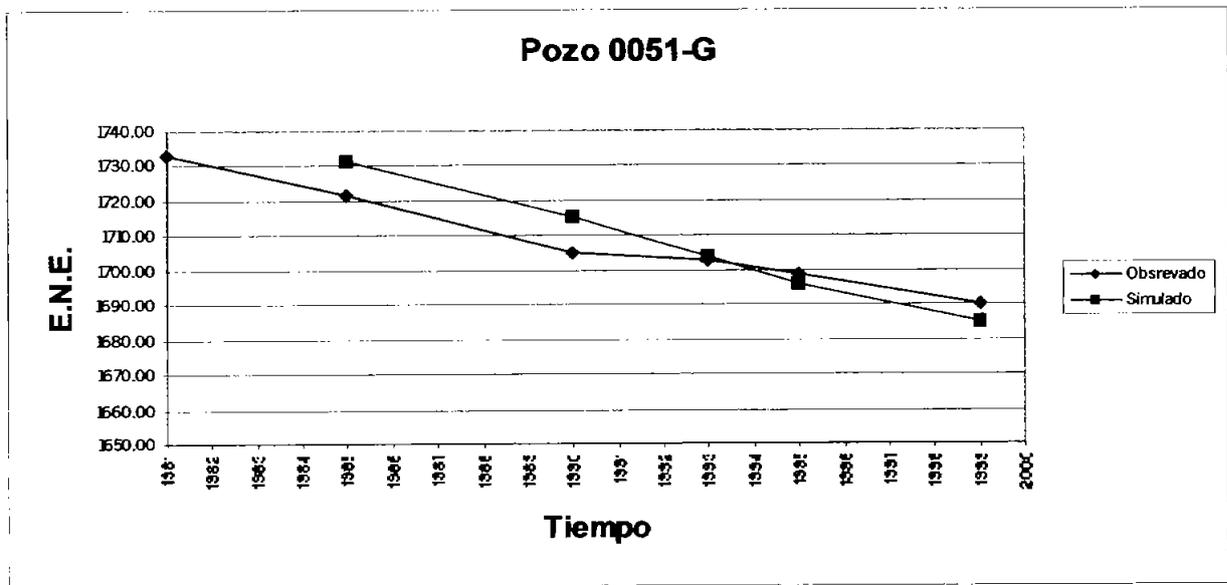


Figura 3.18. Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 0051-G.

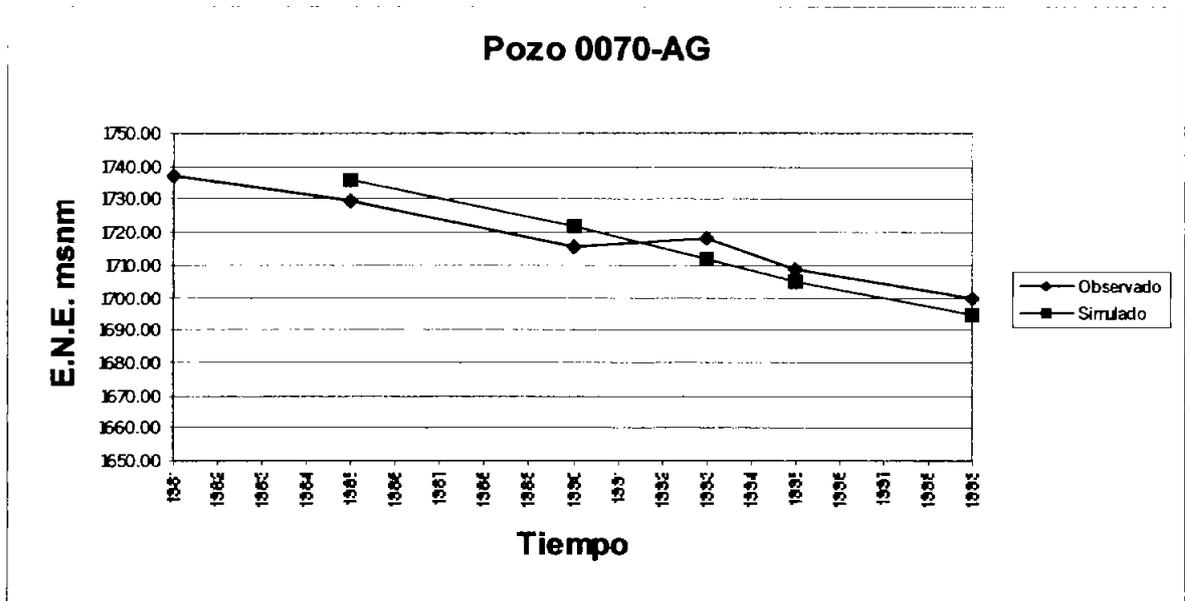


Figura 3.19. Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 0070-G.

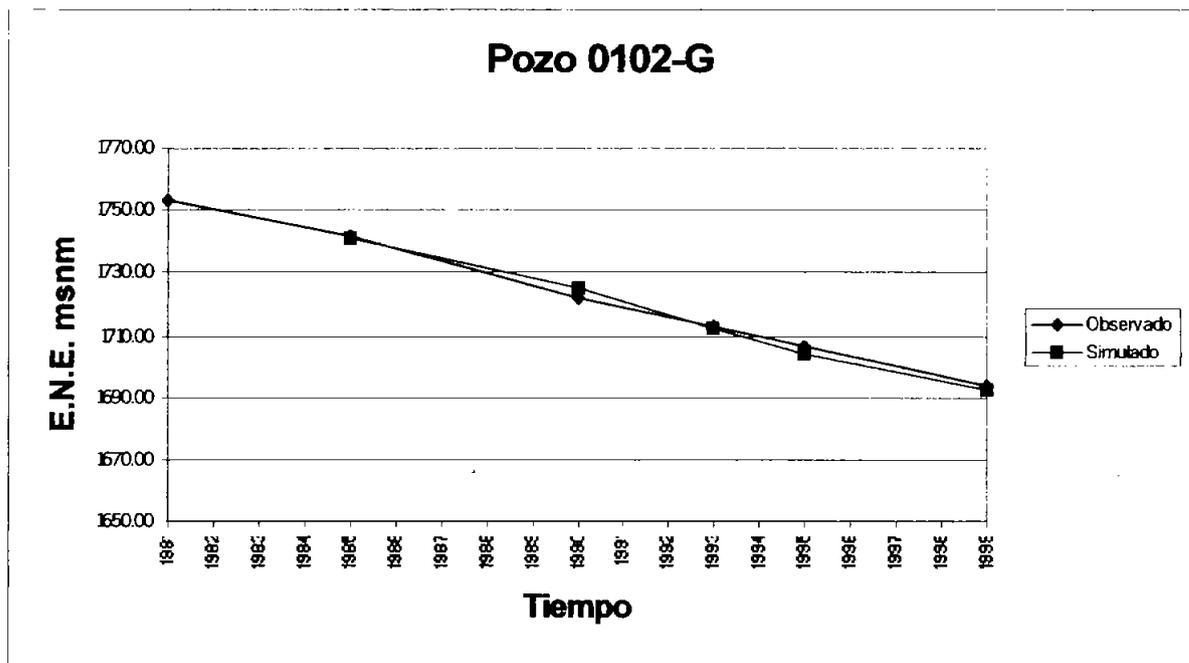


Figura 3.20. Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 0102-G.

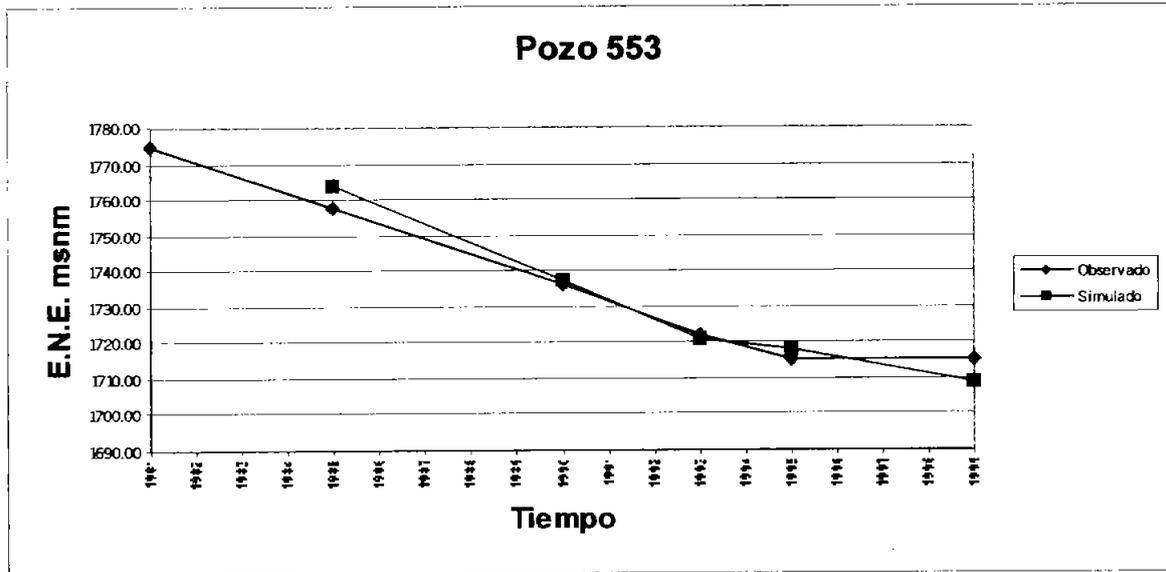


Figura 3.21. Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 553.

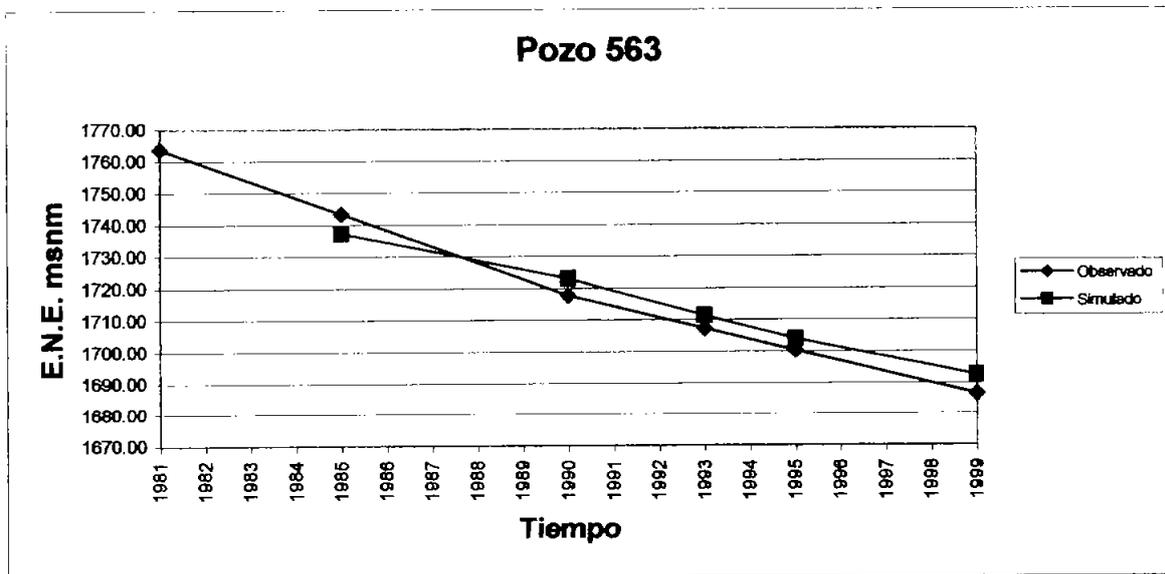


Figura 3.22. Datos observados y simulados contra tiempo del pozo 563.

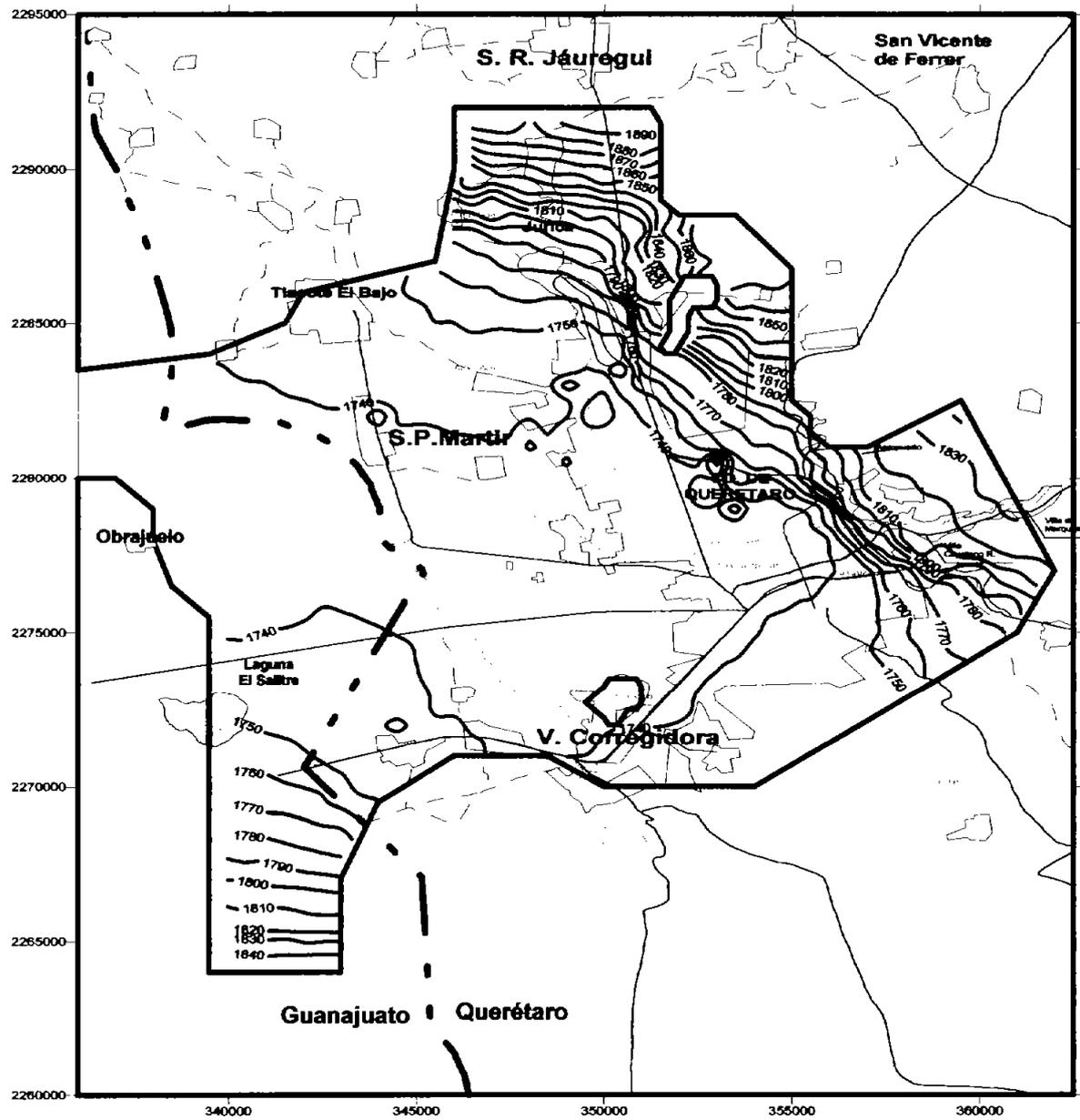


Figura 3.23. Configuración piezométrica simulada para 1985 (msnm).

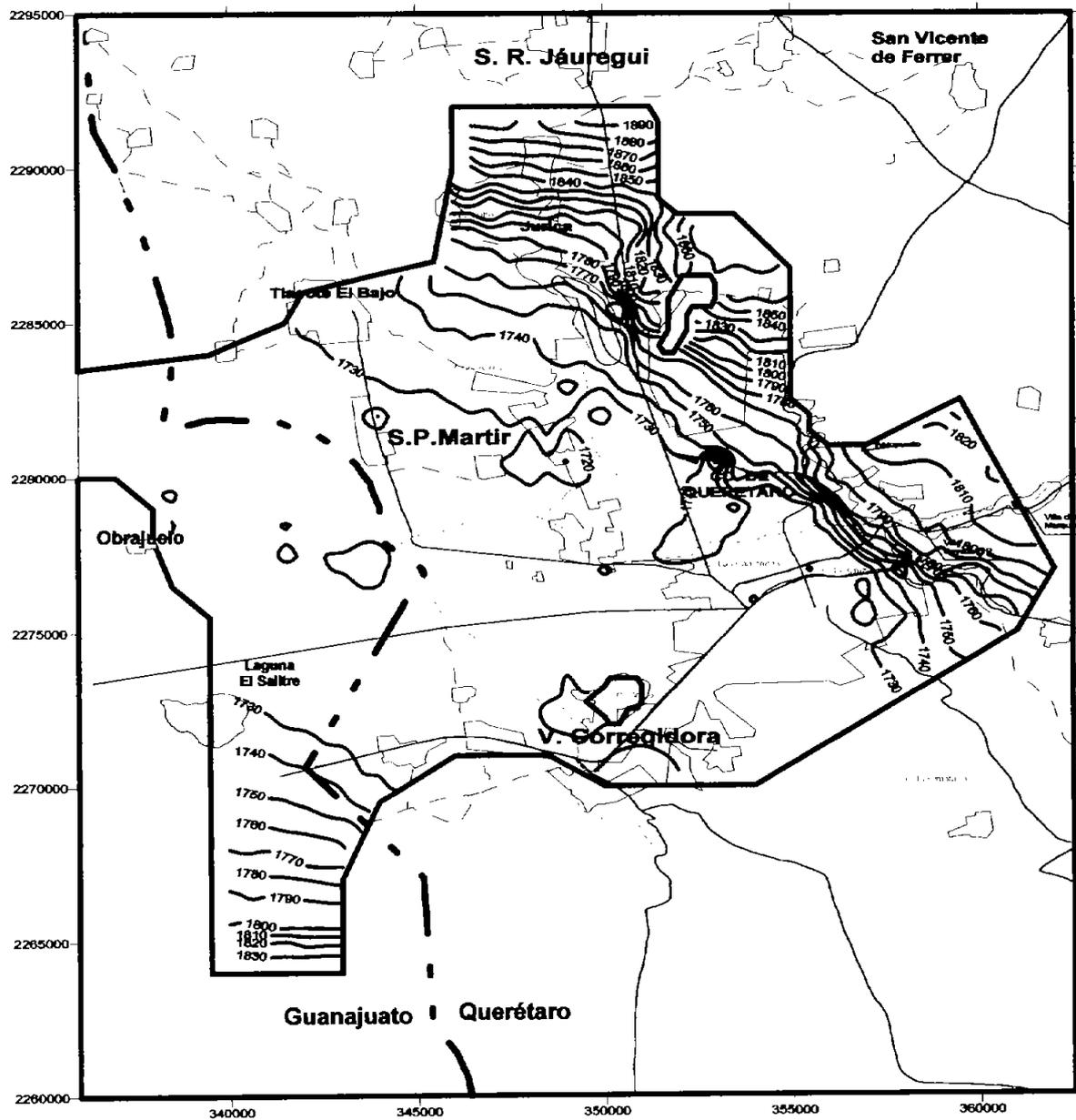


Figura 3.24. Configuración piezométrica simulada para 1990 (msnm).

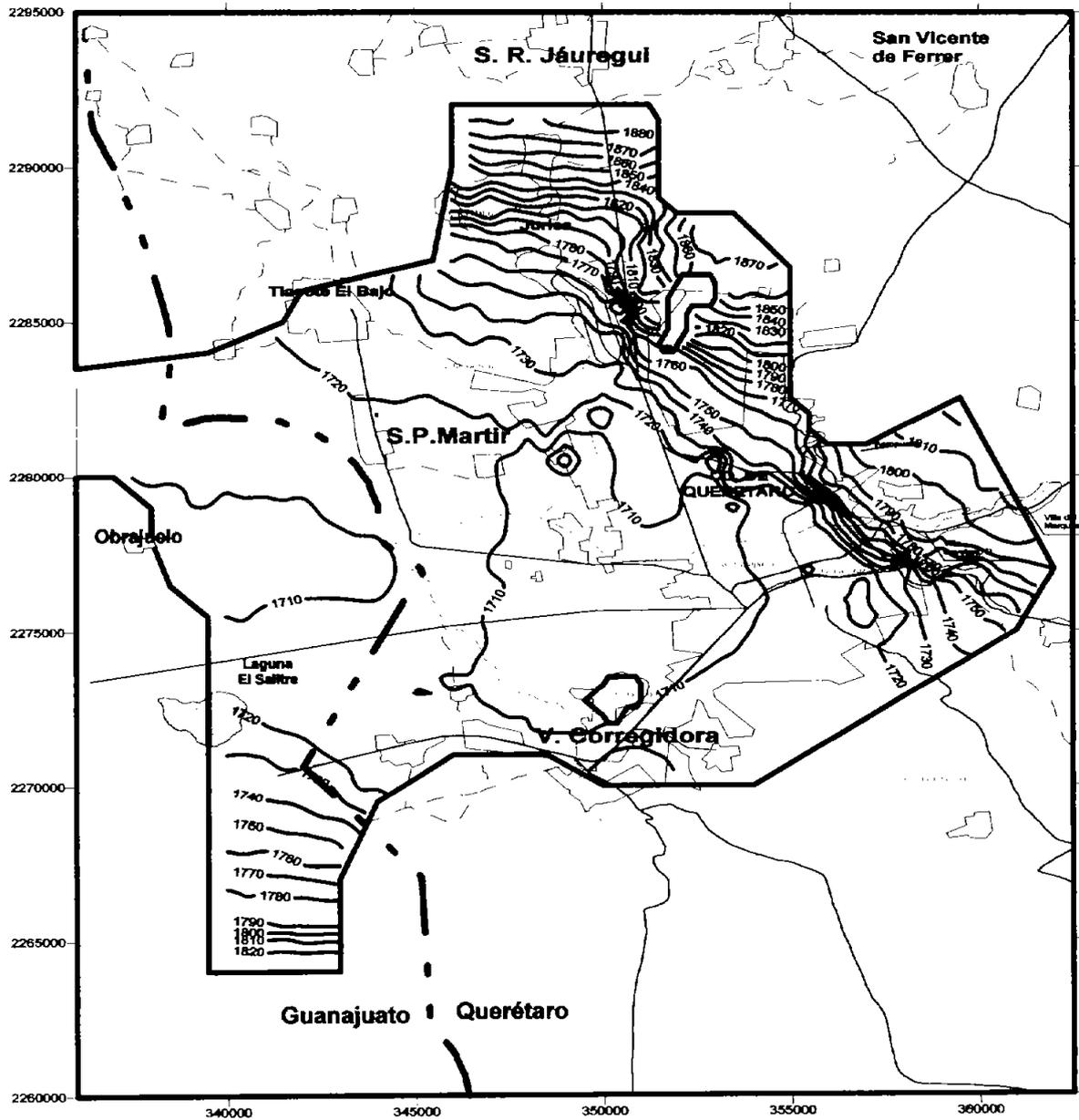


Figura 3.25. Configuración piezométrica simulada para 1993 (msnm).

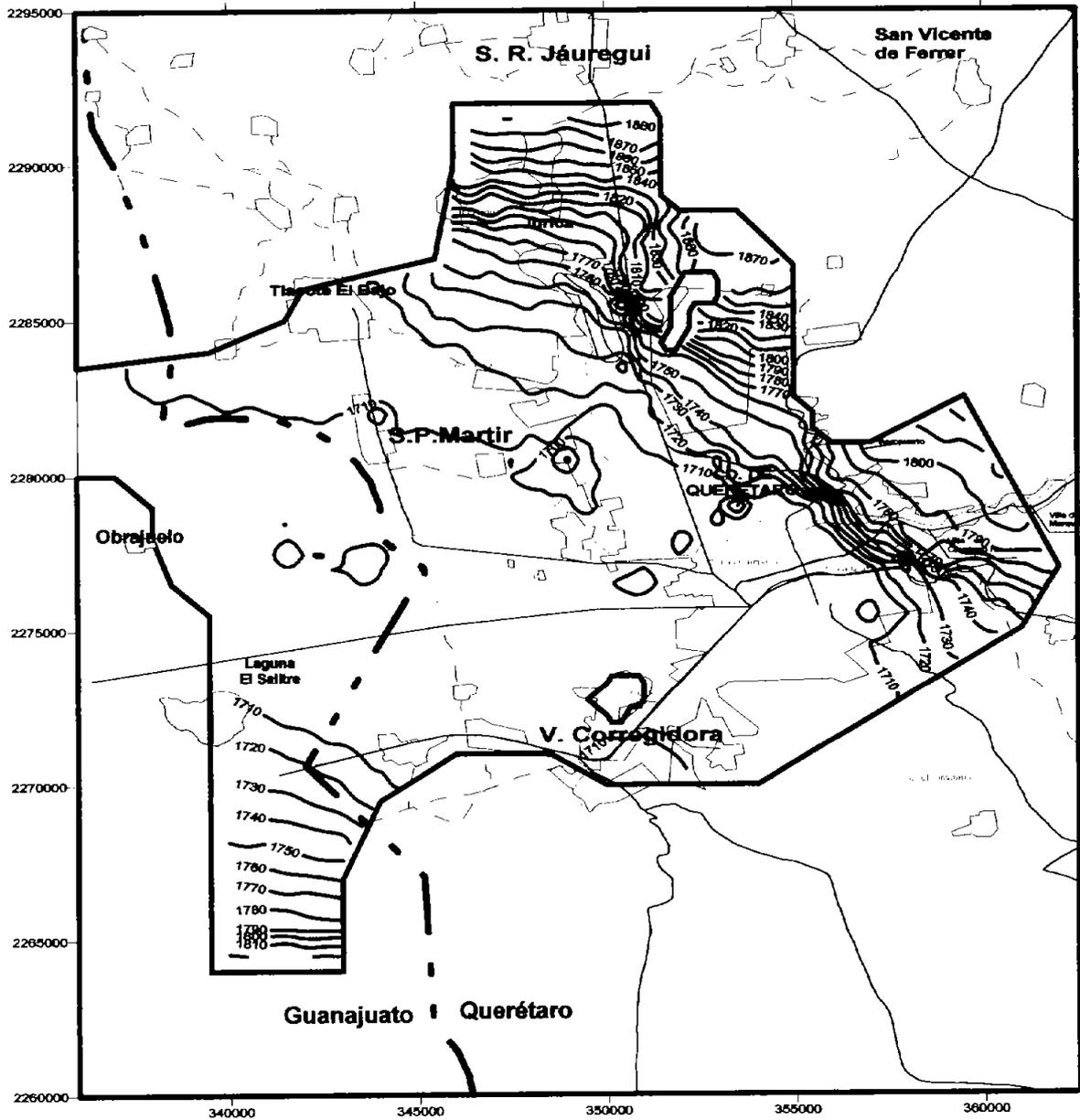


Figura 3.26. Configuración piezométrica simulada para 1995 (msnm).

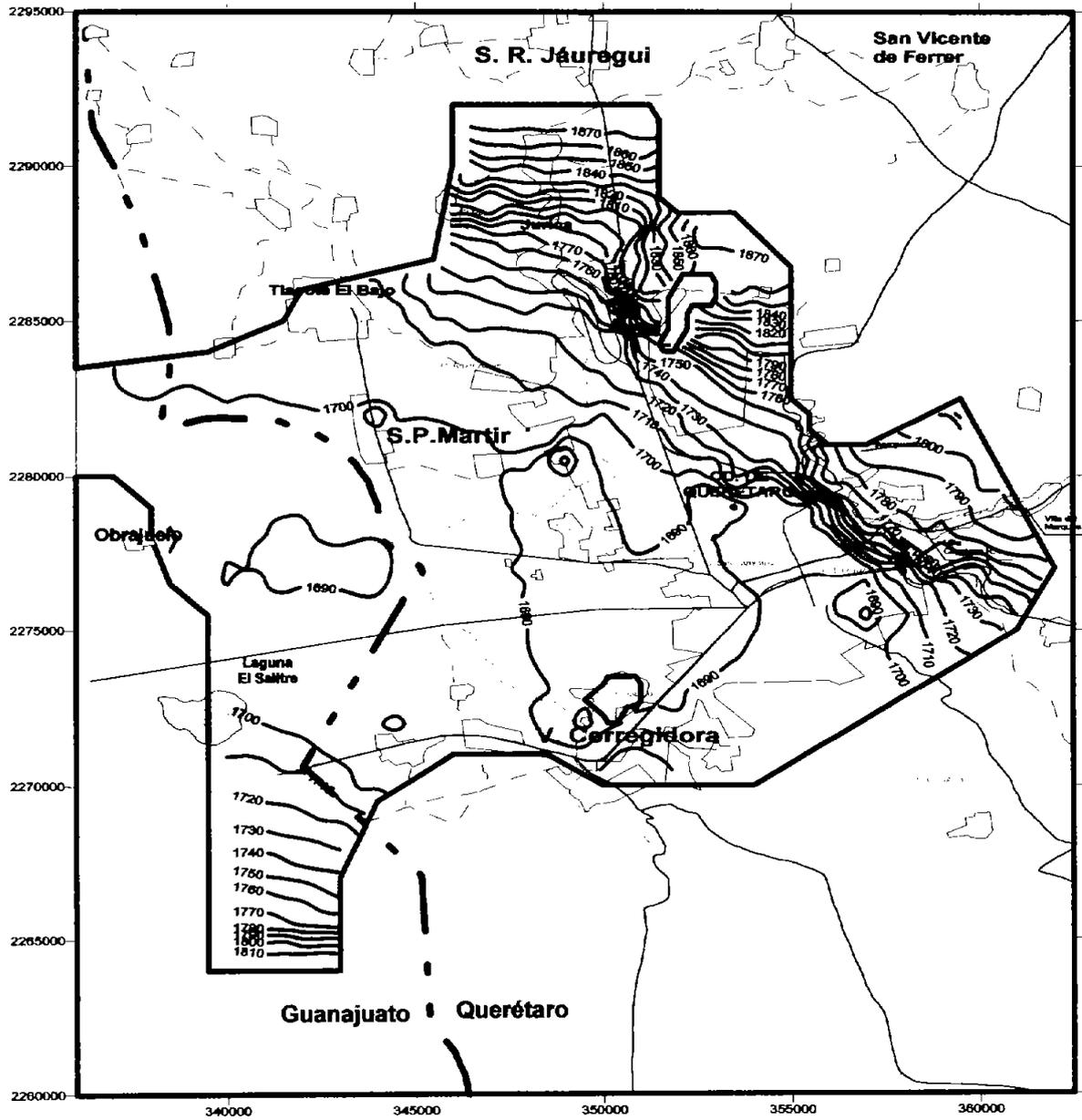


Figura 3.27. Configuración piezométrica simulada para 1999 (msnm).

Se hace además la comparación del balance de masa simulado contra el que se calculó en el capítulo 3 de este trabajo (tabla 3.5)

Tabla 3.5 Comparación del balance de masa simulado contra el calculado

Balance	Periodo 85-90		Periodo 90-93		Periodo 93-95	
	Calculado	Simulado	Calculado	Simulado	Calculado	Simulado
Recarga vertical Mm ³ /año	19.88	26.17	24.26	29.24	20.23	27.56
Entrada hor. Mm ³ /año	14.01	11.50	16.23	11.69	19.51	12.46
Salida hor. Mm ³ /año	2.72	3.95	2.40	3.53	2.03	3.35
Bombeo Mm ³ /año	135.40	135.03	151.42	152.65	152.52	150.39

Las diferencias que se observan en la recarga vertical estimado y simulado se deben a que en el balance calculado se utilizó un solo coeficiente de infiltración para la recarga producto de las ecuaciones de balance, mientras que en el modelo, como se explicó antes, se asignó la recarga debida a la lluvia distribuida espacialmente considerando la recarga estimada por el método de los cloruros (CEA-UAQ, 2002), ver figura 3.8.

Las diferencias observadas en la entrada y salida horizontal se debe principalmente a que en el balance estimado se utilizó un solo valor de la conductividad hidráulica en las fronteras mientras que en el modelo este parámetro fue variado por efectos de la calibración.

En la extracción por bombeo no se observan diferencias importantes, las que se presentan se deben a errores de redondeo en los cálculos numéricos.

3.7 Predicciones

Las predicciones del presente modelo se realizaron para el periodo 1999-2010 y se consideraron los cuatro escenarios siguientes:

Predicción 1. Suponer que el bombeo se mantiene constante.

Predicción 2. Suponer que el bombeo aumenta en un 10 %

Predicción 3. Suponer que el bombeo en todo el acuífero disminuye en un 10%.

Predicción 4. Disminuir el volumen de bombeo en el valle de Querétaro de acuerdo con el caudal estimado que aportará a la ciudad de Querétaro el proyecto de la presa Extóraz conservando constante el bombeo en la zona de Obrajuelo

3.7.1 Predicción 1

Esta predicción se realiza suponiendo que el bombeo en el acuífero permanece constante respecto a la extracción que se tiene para el periodo 1995-1999 y se hace dicha predicción para el periodo 1999-2010.

Para efectuar la simulación se asignó al modelo un periodo que comprende de 1999 al 2010. En este periodo, se asignaron cargas en las condiciones de frontera del tipo I de acuerdo a la tendencia que se tienen en las condiciones de frontera asignadas al modelo en el periodo 1981-1999. Una vez realizadas las modificaciones anteriores se corrió el modelo al 2010.

La configuración piezométrica resultado de la predicción 1 muestra que el nivel representativo en el valle de Querétaro y de Obrajuelo es de 1660 m.s.n.m., teniéndose abatimientos locales principalmente en el centro de la ciudad de Querétaro y San Pedro Mártir que llegan a los 1600 m.s.n.m.. En la figura 3.28 se muestra la piezometría simulada para el año 2010.

Las cargas estimadas en esta predicción indican que el acuífero tendría un abatimiento promedio anual para el periodo 1999-2010 de 2.51 m, con un abatimiento promedio estimado de 27.59 m para todo el periodo. Se observan además abatimientos locales de hasta 38 m en algunas zonas del acuífero. El abatimiento más representativo del acuífero se presenta en el valle de Querétaro y Obrajuelo que va de los 30 a los 34 m y en la zona norte

del modelo se tienen abatimientos que van de los 0 a los 20 m. En la figura 3.29 se muestra la distribución de los abatimientos para el periodo 1999-2010.

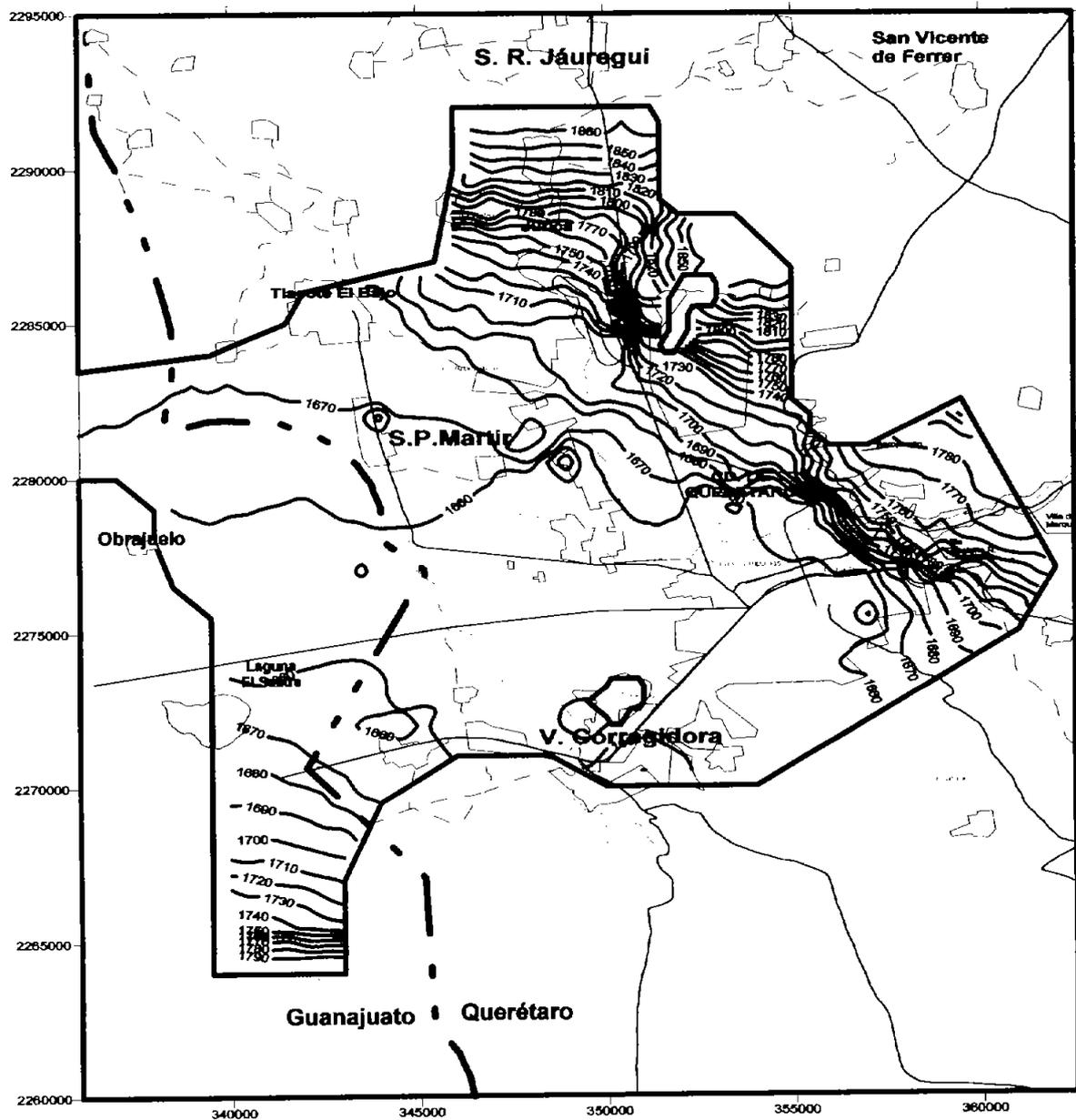


Figura 3.28. Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 1).

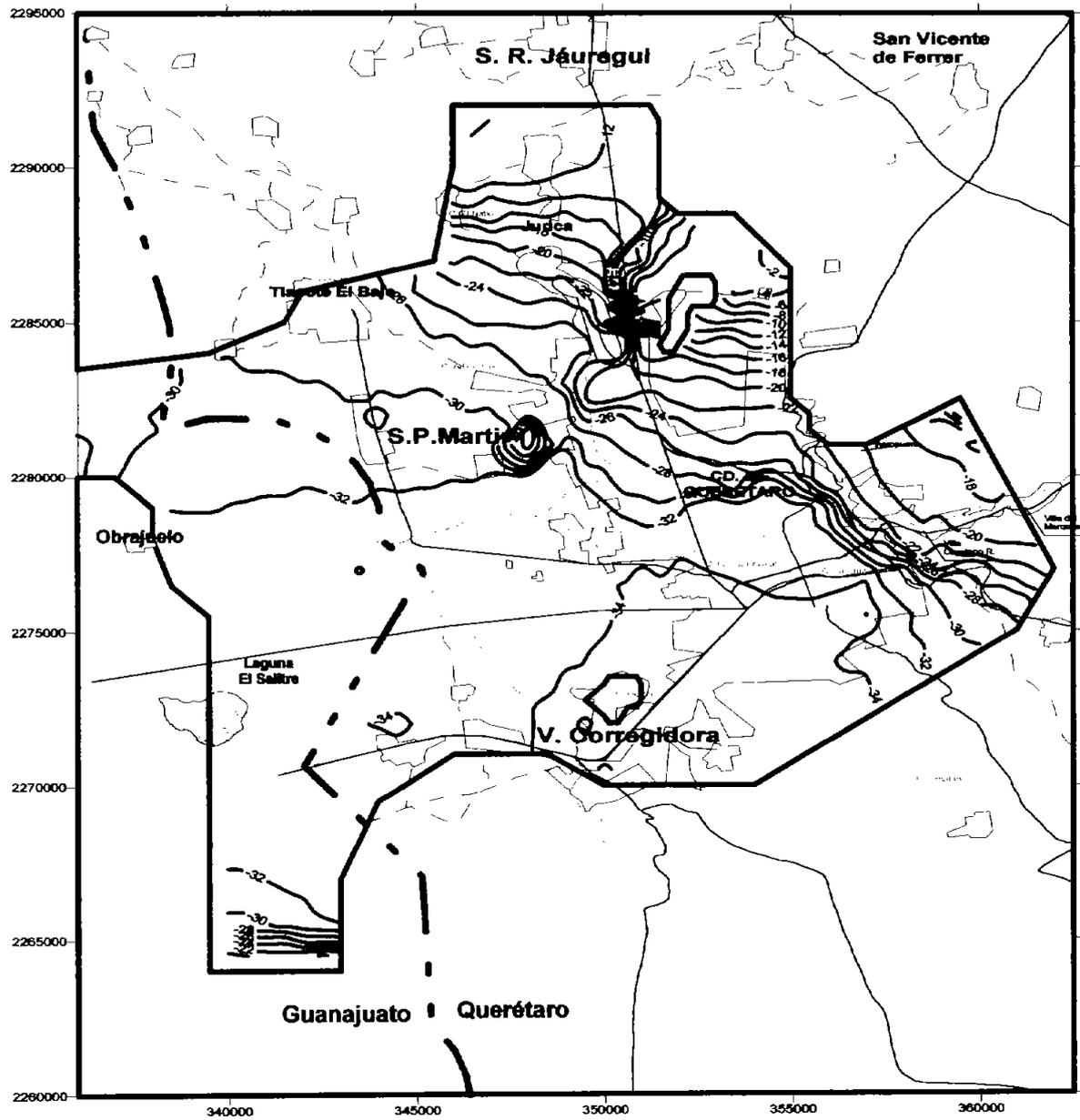


Figura 3.29. Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 1).

3.7.2 Predicción 2

Esta predicción se hace suponiendo que el bombeo en el acuífero aumenta en un 10 % y se corre el modelo al año 2010.

Para efectuar la simulación se asignó al modelo un periodo que comprende de 1999 al 2010. En este periodo, se asignaron cargas en las condiciones de frontera del tipo I de acuerdo a la tendencia que se tienen en las condiciones de frontera asignadas al modelo en el periodo 1981-1999. Una vez realizadas las modificaciones anteriores se corrió el modelo al 2010.

La configuración piezométrica resultado de la predicción 2 muestra que el nivel representativo en el valle de Querétaro y de Obrajuelo es de 1650 m.s.n.m., teniéndose abatimientos locales principalmente en el centro de la ciudad de Querétaro y San Pedro Mártir que llegan a los 1590 m.s.n.m.. En la figura 3.30 se muestra la piezometría simulada para el año 2010.

Las cargas estimadas en esta predicción indican que el acuífero tendría un abatimiento promedio anual para el periodo 1999-2010 de 2.83 m, con un abatimiento promedio estimado de 31.10 m para todo el periodo. Se observan además abatimientos locales de hasta 48 m en algunas zonas del acuífero. El abatimiento más representativo del acuífero se presenta en el valle de Querétaro y Obrajuelo con un abatimiento promedio de 40 m y en la zona norte del modelo se tienen abatimientos que van de los 0 a los 30 m. En la figura 3.31 se muestra la distribución de los abatimientos para el periodo 1999-2010.

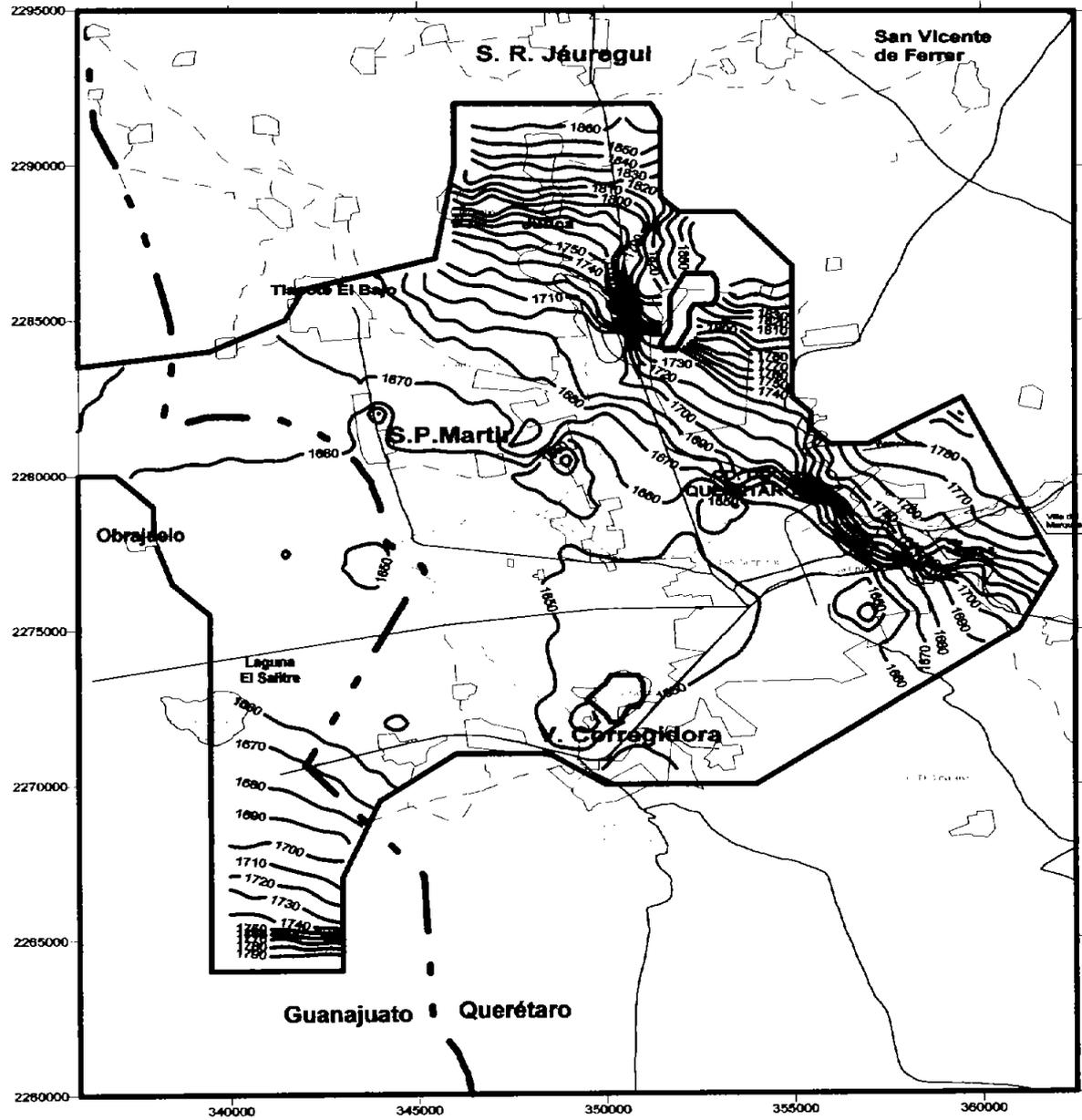


Figura 3.30 Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 2).

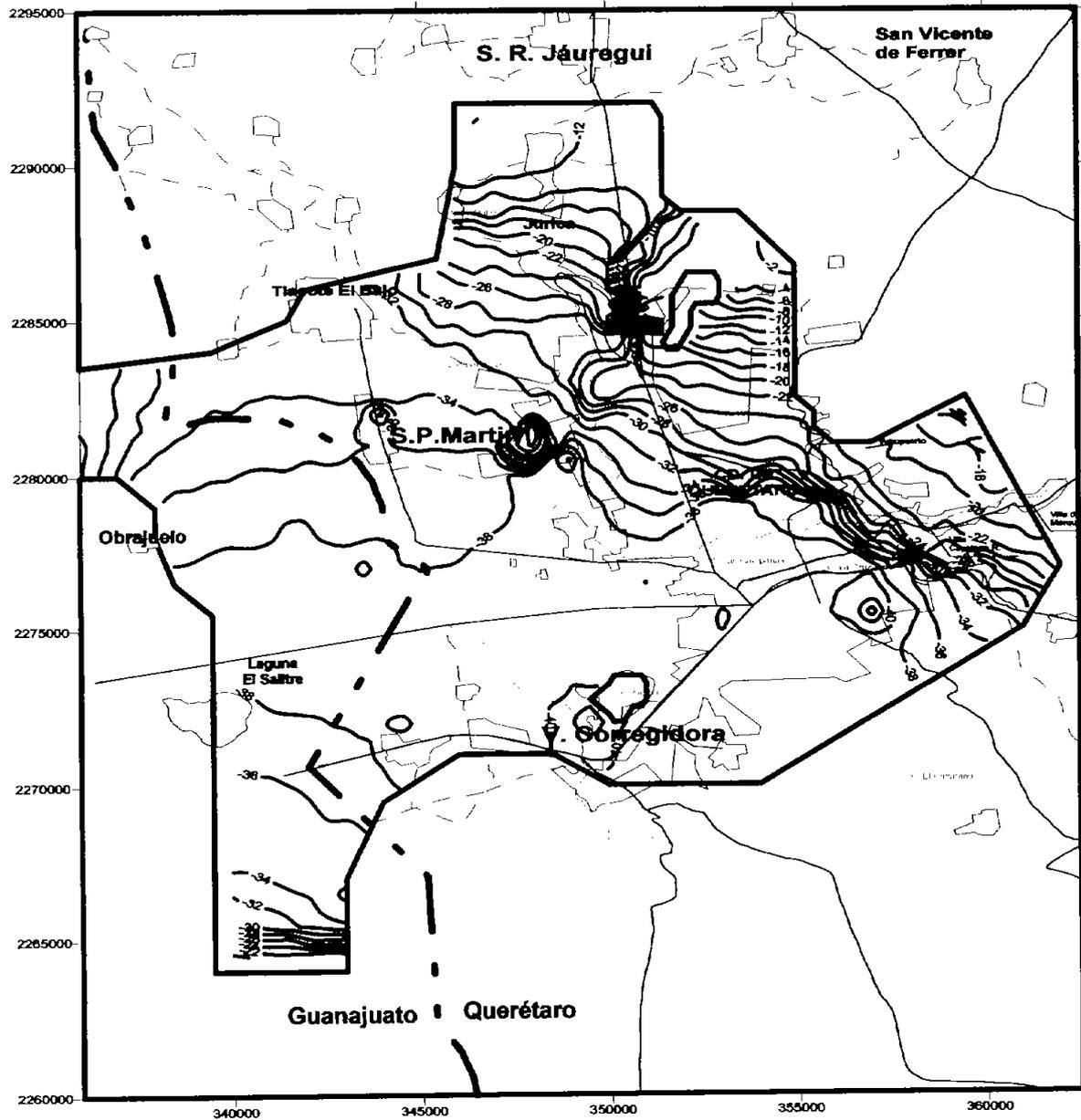


Figura 3.31 Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 2).

3.7.3 Predicción 3

En esta predicción se reduce el bombeo en el acuífero en un 10 % y se corre el modelo al año 2010.

Para efectuar la simulación se asignó al modelo un periodo que comprende de 1999 al 2010. En este periodo, se asignaron cargas en las condiciones de frontera del tipo I de acuerdo a la tendencia que se tienen en las condiciones de frontera asignadas al modelo en el periodo 1981-1999. Una vez realizadas las modificaciones anteriores se corrió el modelo al 2010.

La configuración piezométrica resultado de la predicción 3 muestra que el nivel representativo en el valle de Querétaro y de Obrajuelo es de 1670 m.s.n.m., teniéndose abatimientos locales principalmente en el centro de la ciudad de Querétaro y San Pedro Mártir que llegan a los 1610 m.s.n.m.. En la figura 3.32 se muestra la piezometría simulada para el año 2010.

Las cargas estimadas en esta predicción indican que el acuífero tendría un abatimiento promedio anual para el periodo 1999-2010 de 2.19 m, con un abatimiento promedio estimado de 24.12 m para todo el periodo. Se observan abatimientos locales de hasta 32 m en algunas zonas del acuífero. El abatimiento más representativo del acuífero se presenta en el valle de Querétaro y Obrajuelo que va de los 26 a los 30 m y en la zona norte del modelo se tienen abatimientos que van de los 0 a los 10 m. En la figura 3.33 se muestra la distribución de los abatimientos para el periodo 1999-2010.

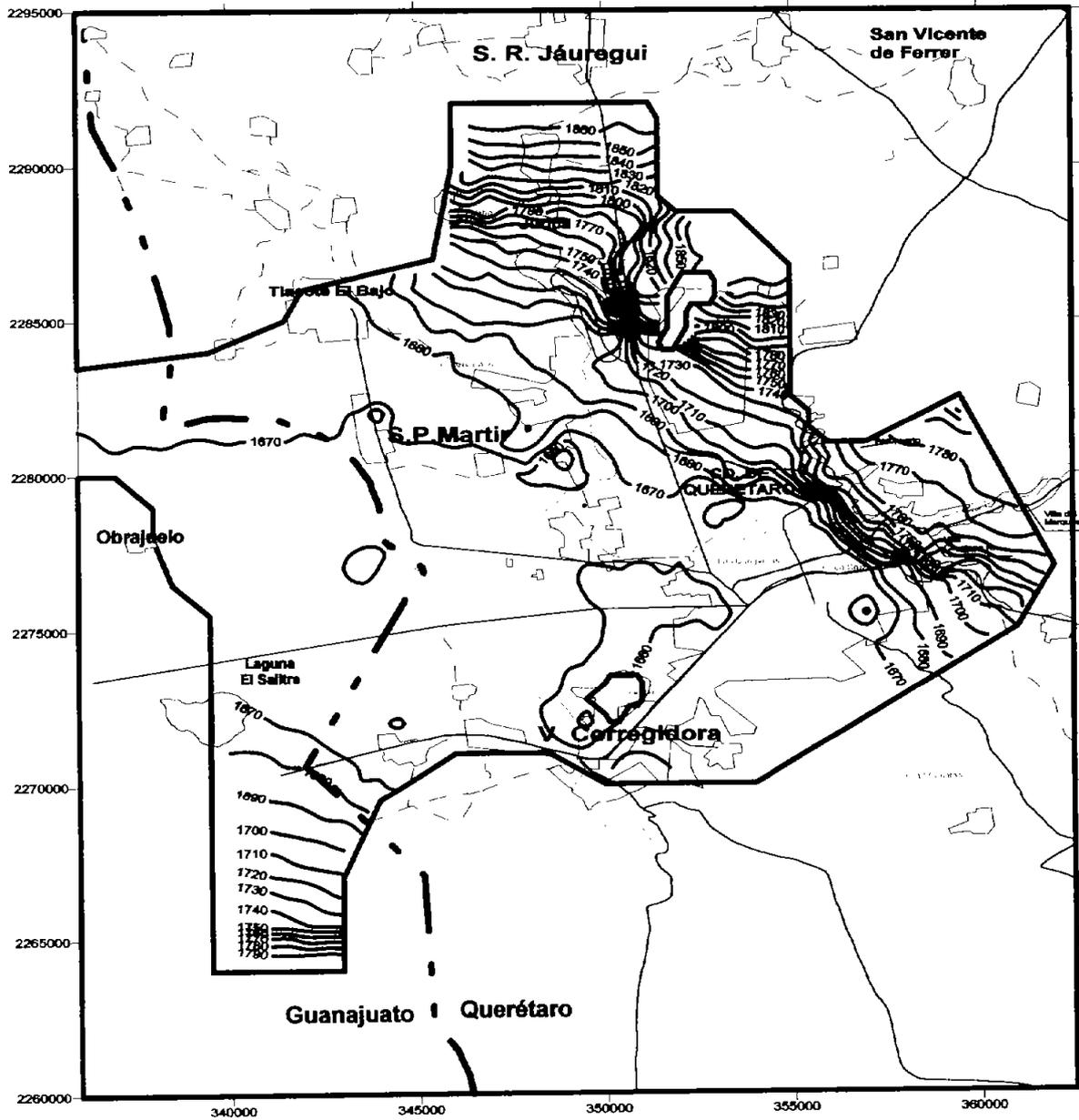


Figura 3.32. Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 3).

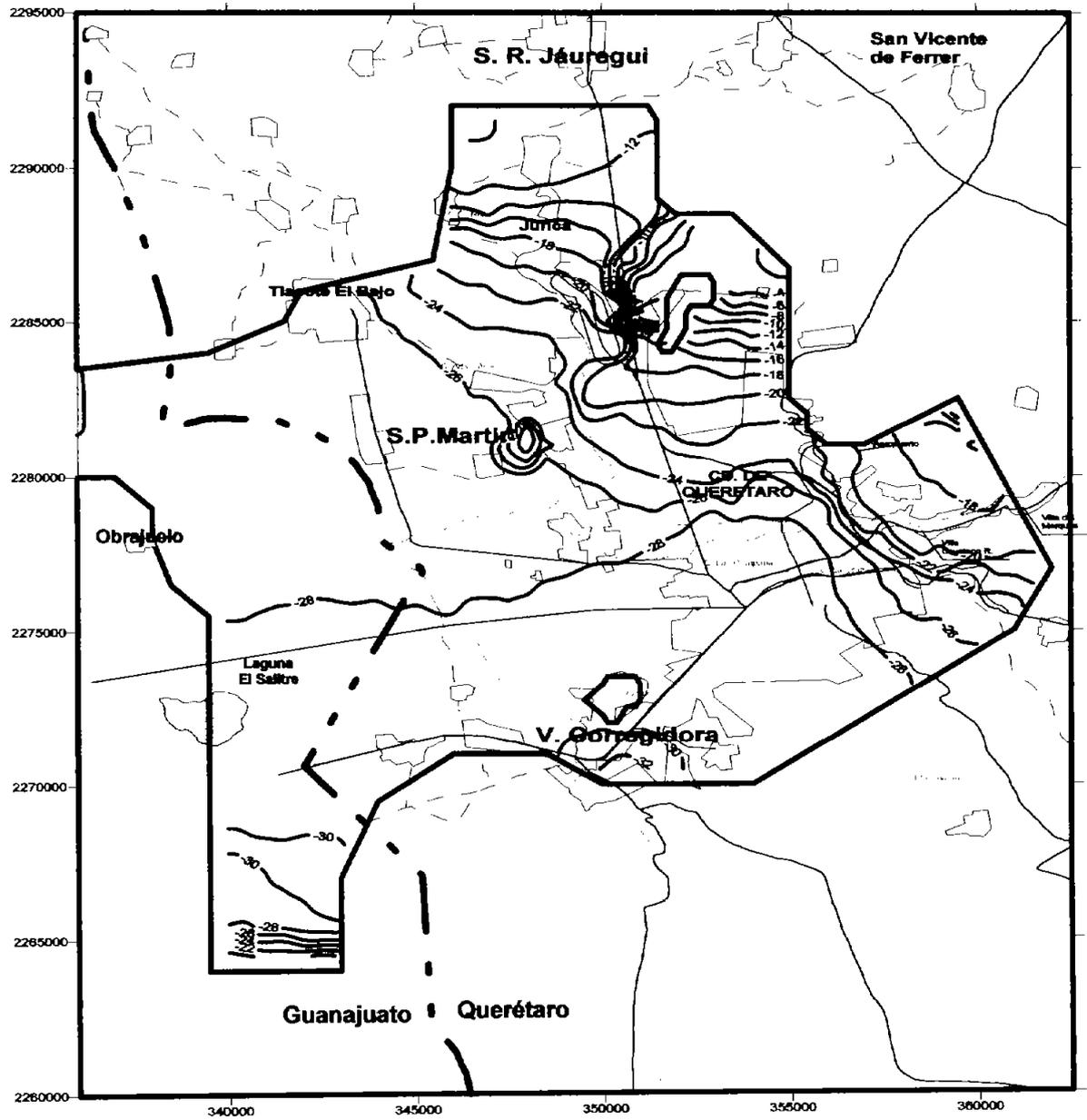


Figura 3.33. Zonas de abatimiento para el periodo 1999-2010, en m (predicción 3).

3.7.4 Predicción 4

Estudios realizados a principios de los 90's sobre la geohidrología (IMTA-CFE, 2002) del valle de Querétaro, muestran el comportamiento del acuífero y las repercusiones que se tendrían si la tendencia de explotación se mantiene, esta sobre explotación ha originado la formación de conos de abatimientos en la parte central del valle, si los conos de abatimiento y las franjas de alto gradiente hidráulico llegaran a coincidir con las fallas normales, los efectos nocivos geotécnicos sobre la infraestructura urbana serían grandes debido a los fenómenos de hundimiento y fallamiento existente en el valle de Querétaro.

Por otro lado en el balance de masa realizado en el presente trabajo se tiene que el acuífero presenta un déficit de $103.09 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (3269 lps) que origina un abatimiento promedio de 2.6 m por año.

Ante esta problemática el organismo operador (Comisión Estatal de Aguas) está analizando diferentes alternativas de abastecimiento para solucionar los problemas señalados anteriormente, una de éstas es la explotación de las aguas superficiales del río Extóraz mediante la construcción de una presa que entregaría un gasto de 2100 lps a la ciudad de Querétaro con un régimen de operación de 24 horas diarias.

Con este caudal aportado a la ciudad de Querétaro se estimó el porcentaje que dejaría de extraerse al acuífero con la puesta en marcha del proyecto de la presa Extóraz. El porcentaje que representa el caudal de 2189 lps es equivalente al 68 % de la extracción total del acuífero. Se predijeron los niveles al 2010 disminuyendo la extracción del acuífero en un 68 % a partir de 1999. Se agregó un periodo más al modelo para el periodo 99-2010, conservando las mismas condiciones de frontera que se tenían para el año de 1999 y a todos los pozos de extracción asignados al modelo se les disminuyó la tasa de bombeo en un 68 %. Una vez realizadas las modificaciones anteriores al modelo se procedió a correr el mismo para hacer la predicción.

Se observan en las configuraciones piezométricas simuladas para 2010 que los conos de abatimiento han disminuido presentándose un flujo preferencial hacia el acuífero de Obrajuelo. Por otro lado, de acuerdo con los datos estimados con la predicción se obtuvo un abatimiento promedio anual de 0.86 m de 1999 al 2010, teniéndose un abatimiento promedio estimado de 9.46 m en todo el periodo. Además, se observa que hay zonas en la que se tienen recuperaciones importantes, principalmente en la zona central del valle de Querétaro, en donde se observan recuperaciones muy puntuales de hasta 40 m. Sin embargo, la recuperación más representativa es de 15 m en casi toda la parte central y sur de la ciudad de Querétaro. Las zonas de abatimiento se presentan principalmente en el acuífero del valle de Obrajuelo, en donde no se redujo el bombeo y se mantuvo constante de acuerdo con la extracción que se tenía en esa zona para el año de 1999. Los abatimientos más representativos en esta zona van de los 10 a los 20 m. En la figura 3.34 se muestran los niveles simulados al 2010 con la disminución del 68 % del bombeo y en la figura 3.35 se presentan las zonas de abatimientos y recuperación obtenidos en esta predicción.

En la tabla 3.6 se presenta un resumen de las predicciones, se observa en esta tabla los abatimientos promedio que tendría el acuífero para el periodo 1999-2010 de acuerdo a los cuatro escenarios antes descritos.

En la tabla 3.7 se presentan las diferencias que se tienen entre los abatimientos para los diferentes escenarios de predicción. En esta tabla se observa claramente como el acuífero se abatiría menos si el proyecto Extóraz es puesto en marcha.

Por otro lado en las figuras 3.36 y 3.37 se aprecian los abatimientos promedios en las predicciones.

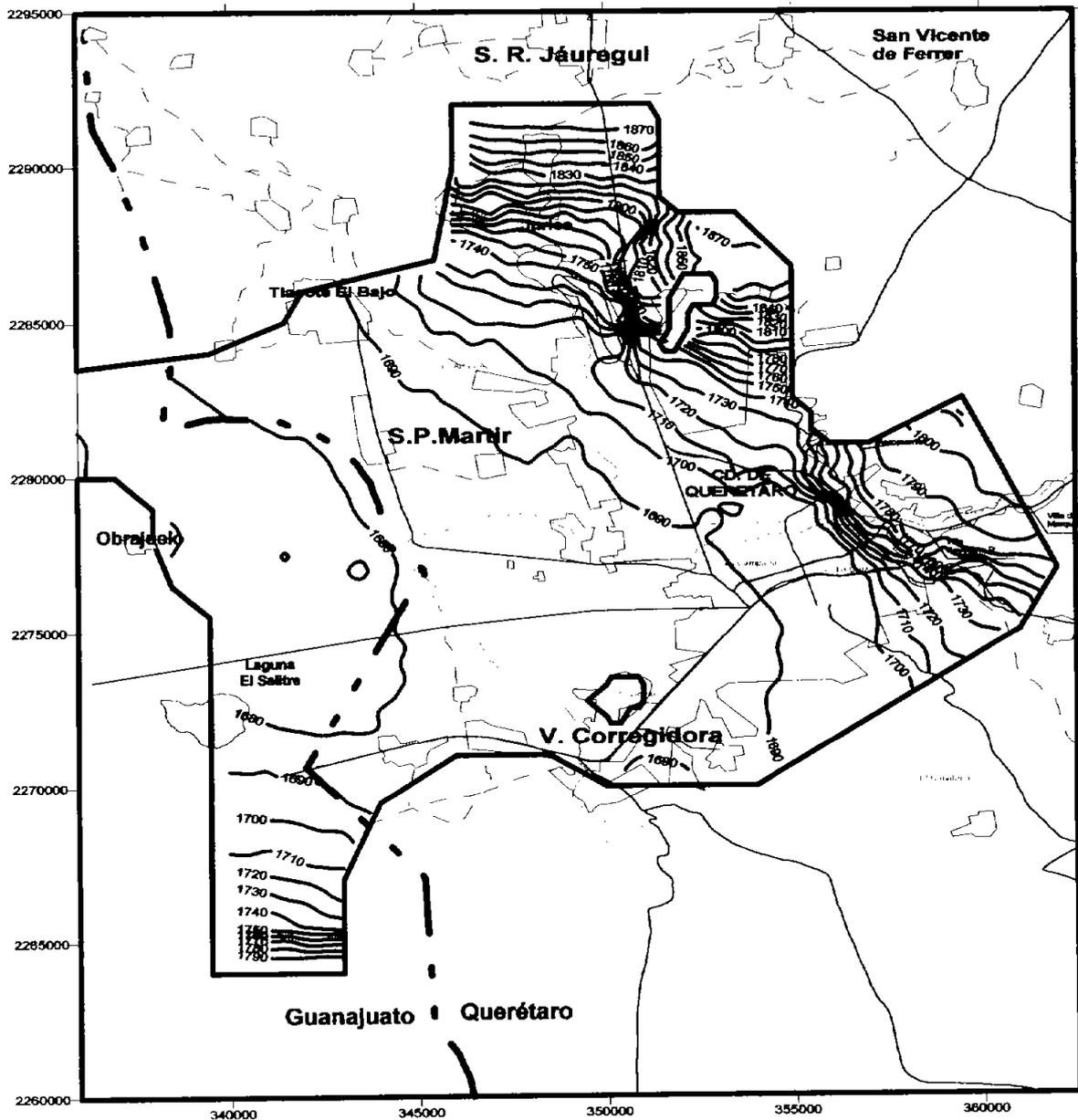


Figura 3.34 Piezometría simulada para el año 2010, en msnm (predicción 4)

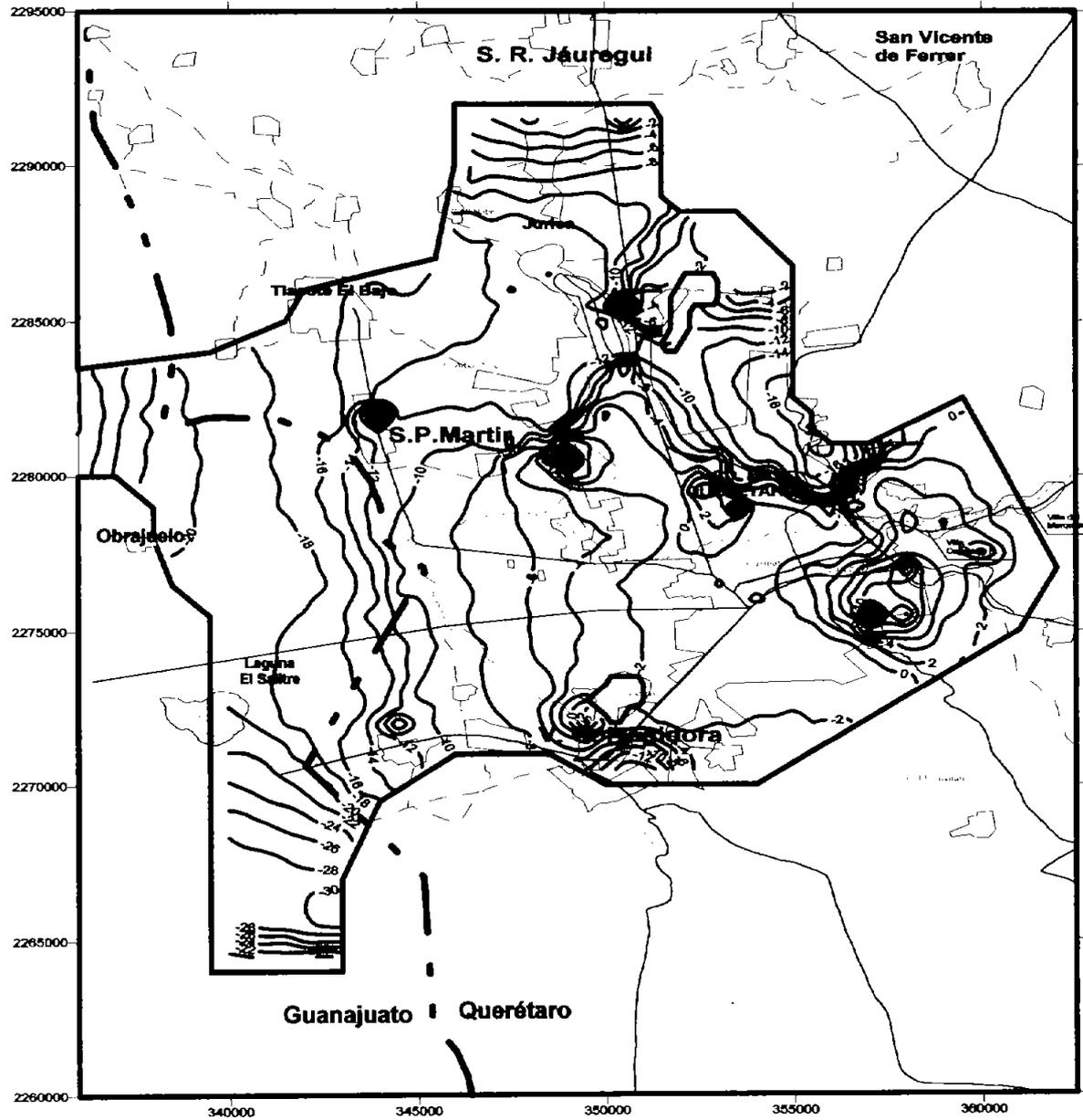


Figura 3.35. Zonas de abatimiento y recuperación para el periodo 1999-2010, en m (predicción 4).

Tabla 3.6 Abatimiento promedio para los escenarios de predicción (1999-2010).

No.	ESCENARIO	Abatimiento/periodo (m)	Abatimiento/año (m)
1	Bombeo constante	27.59	2.51
2	Más 10 % del Bombeo	31.10	2.83
3	Menos 10 % del bombeo	24.12	2.19
4	Menos 68 % del bombeo	9.46	0.86

Tabla 3.7 Diferencia entre los abatimientos para todo el periodo de predicción de los diferentes escenarios (columna – renglón).

Escenario	1	2	3	4
1	0	3.51	-3.47	-18.13
2	-	0	-6.98	-21.64
3	-	-	0	-14.66
4	-	-	-	0

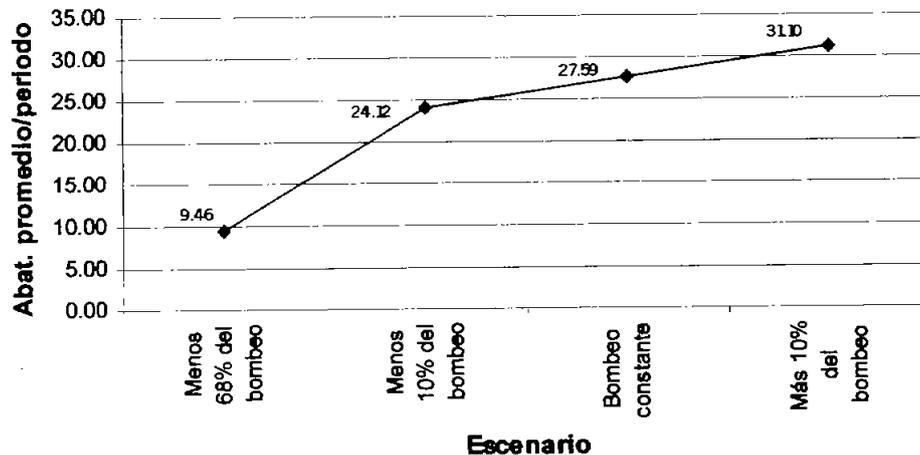


Figura 3.36 Abatimiento promedio para el periodo 1999-2010 de acuerdo con los cuatro escenarios de predicción.

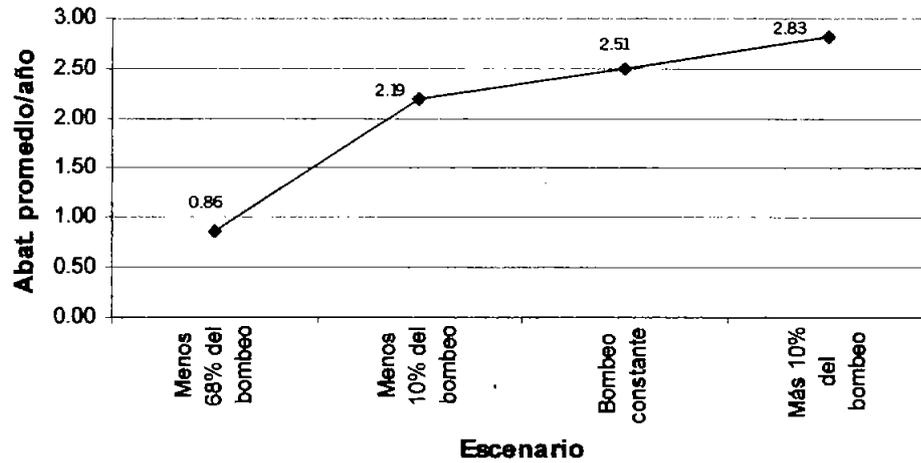


Figura 3.37 Abatimiento promedio anual para el periodo 1999-2010 de acuerdo con los cuatro escenarios de predicción.

Diferencia entre predicción 4 y predicción 1

Se realizó una configuración de la diferencia que existe entre la predicción 4 (considera disminuir la extracción del acuífero de acuerdo al caudal que aportaría la presa Extóraz) y la predicción 1 (el bombeo se mantiene constante). En la figura 3.38 se observa que la diferencia que se tendría entre ambos escenarios es de 30 a 34 m en el centro del valle de Querétaro y de 10 a 20 m en la zona del valle de Obrajuelo.

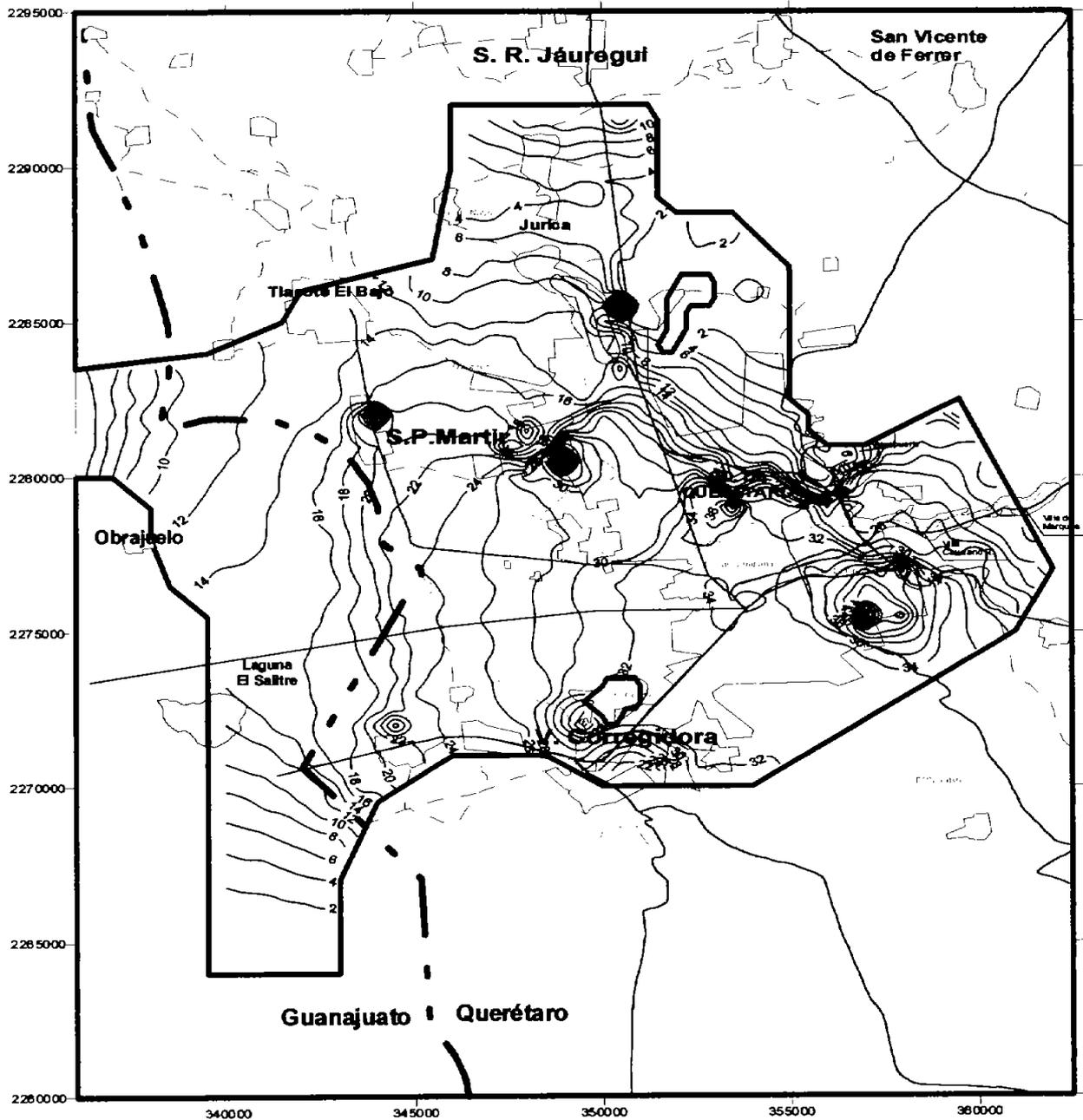


Figura 3.38 Diferencia entre el nivel piezométrico simulado de la predicción 4 y la predicción 1 (m).

3.8 Análisis de sensibilidad

En el análisis de sensibilidad nos interesa examinar cómo el cambio en un parámetro afecta el resultado del modelo. Esto es de gran utilidad porque permite identificar el parámetro más crítico, esto es, el análisis de sensibilidad permite medir el cambio en el resultado del modelo dado un cambio en un conjunto de parámetros de entrada del modelo en un rango previamente establecido.

Los cuidados que se tienen que tomar al realizar el análisis de sensibilidad son: primero reconocer que el cambio en el resultado depende de cómo se haya construido el modelo y de los valores iniciales de los parámetros a analizar. Segundo, que los cambios en los parámetros deben ser iguales para todos de manera que se puedan comparar los resultados. Tercero, que al analizar la sensibilidad de los parámetros hay que hacerlo de uno en uno si se desea determinar cuáles son los parámetros más críticos.

El primer paso para desarrollar un análisis de sensibilidad es el identificar qué parámetros del modelo deberán ser variados. Después de esto, para cada entrada se deben ejecutar las simulaciones y predicciones con el valor de la entrada variado en un rango especificado; graficar los errores de calibración y errores en las predicciones del modelo como función de los valores de entrada (ASTM, 1994). Los errores se miden comparando los resultados de la simulación del modelo calibrado contra los resultados de la simulación con los parámetros modificados en los porcentajes establecidos.

Los parámetros que se variaron en este caso fueron la conductividad hidráulica, el rendimiento específico y la recarga por ser los parámetros en los que más incertidumbre se tiene. Estos parámetros se cambiaron en un -10% , -20% , $+10\%$ y $+20\%$. En las figuras 3.39 y 3.40 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad de cada parámetro para el año de 1993, y la predicción al 2010 respectivamente. Se hizo el análisis de sensibilidad para el año de 1993 que es el último año considerado en la calibración del modelo. El análisis de sensibilidad de la predicción se hizo para el año 2010 con la extracción del bombeo constante respecto al último año de modelación. Se tomó únicamente este

escenario para el análisis de sensibilidad considerando que para los demás escenarios la sensibilidad del modelo sería parecida.

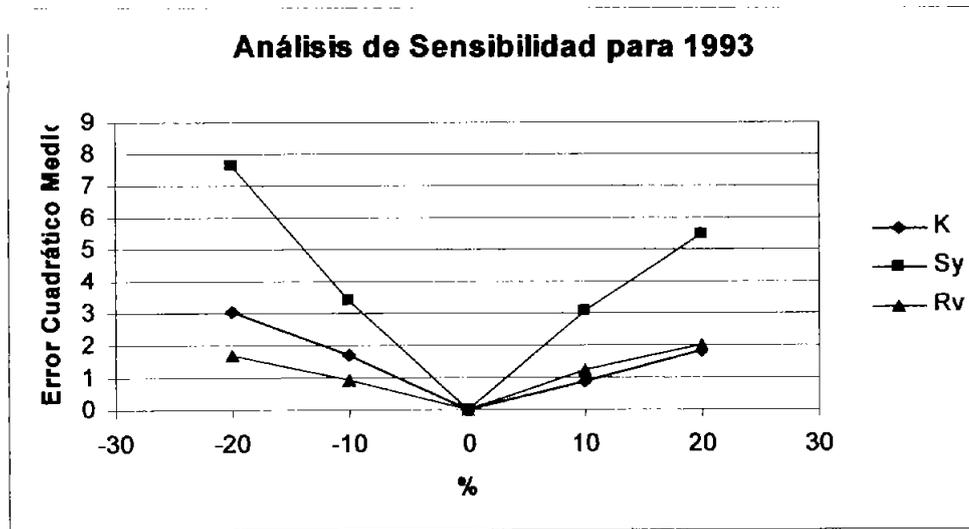


Figura 3.39.- Análisis de sensibilidad para el año de calibración 1993.

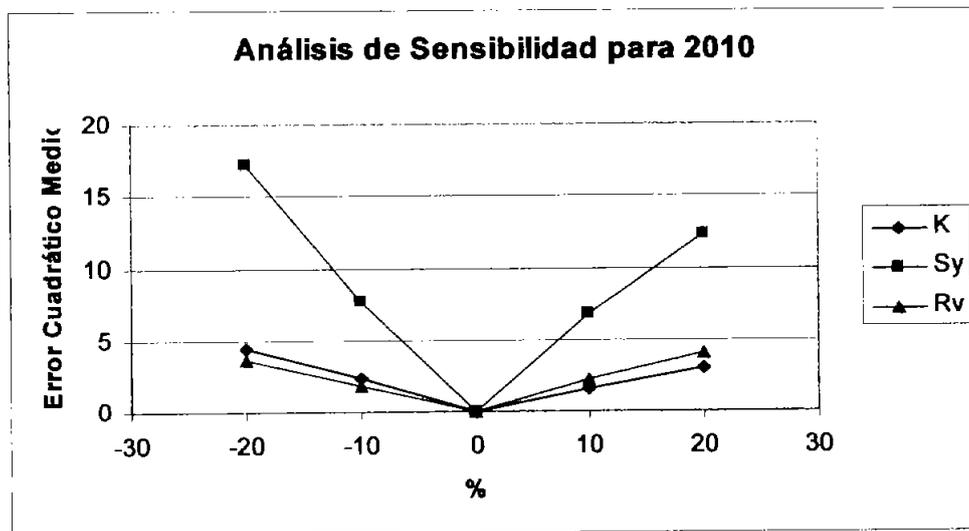


Figura 3.40 Análisis de sensibilidad para el año de predicción 2010.

Del análisis de sensibilidad se observa que para 1993 hay más sensibilidad al disminuir los valores de Sy y K que al aumentarlos, no así para la recarga vertical, para el que se observa

que es más sensible al aumentar su valores, aunque a este parámetro es poco sensible el modelo. El parámetro al que es más sensible el modelo es el rendimiento específico.

En el análisis de sensibilidad para el año de predicción (2010) se observa que el rendimiento específico tiene más sensibilidad al disminuir los valores de este parámetro no así para la conductividad hidráulica y la recarga vertical en donde se observa que se tiene aproximadamente la misma sensibilidad al aumentar o disminuir los valores de estos parámetros, además de que estos parámetros son los menos sensibles para la predicción.

Se puede observar que la sensibilidad para todos los parámetros es siempre mayor para el año 2010, esto se debe a que el efecto sobre la carga hidráulica del cambio de cada parámetro es acumulativo. Esto es los cambios en h se incrementan en el tiempo con respecto a la carga hidráulica calibrada.

3.9 Ventajas y limitaciones del modelo

Ventajas

El modelo en elemento finito permitió que la malla numérica abarcara la zona de interés en forma exacta.

También permitió refinar la malla en la zona en donde existen más pozos, redundando en mayor precisión en la solución en esa zona.

Se modelo de forma conjunta a los acuíferos del valle de Querétaro y de Obrajuelo.

Se realizó un modelo hasta el año de 1999 a diferencia de otros modelos que únicamente se modelaron hasta el año de 1995 (Guysa, 1996 y UAQ-CEA, 2002).

Limitaciones

Las limitaciones más importantes del modelo son las siguientes:

En el modelo se consideró en la parte norte del valle de Obrajuelo una frontera de descarga considerando que el comportamiento piezométrico realizado con los pocos datos niveles estáticos disponibles indicaban este comportamiento, sin embargo en esa zona es necesario tener mayor información de los niveles estáticos para definir si la frontera que se tiene es realmente de descarga o si en esa zona se tiene una frontera impermeable o de recarga.

Existe falta de información de los niveles estáticos a un lado y a otro de la Falla Sur ubicada al sur del área de estudio en el lineamiento del río El Pueblito con respecto a la dirección del flujo, para verificar si realmente ésta funciona como una barrera impermeable, principalmente en la zona del lineamiento del río El Pueblito.

Información sobre pruebas de bombeo en donde se estime el rendimiento específico para reducir la incertidumbre en este parámetro ya que el modelo resultó altamente sensible al mismo.

Datos de conductividad hidráulica en la zona de Obrajuelo, para comparar éstos con los valores obtenidos en la calibración del modelo; y en las zonas de recarga y descarga horizontal del acuífero para verificar los datos utilizados en el balance de masa así como los obtenidos en la calibración del modelo.

Por sugerencia de la CEAQ en el modelo se consideró constante la extracción por bombeo para el periodo 1996-1999, sin embargo, es necesario actualizar éste con datos que se tengan actualmente.

El modelo se diseñó utilizando una sola capa (modelo bidimensional) debido a que los datos piezométricos con que se cuenta representan un promedio de la piezometría sobre toda la profundidad del pozo y no se cuenta con información que permita evaluar los gradientes piezométricos verticales, sin embargo, lo más apropiado sería utilizar un modelo

de varias capas debido a la presencia de diferentes estratos de medio poroso y fracturado intercalados y la presencia de confinamientos locales, lo que hace suponer que los gradientes verticales en el acuífero no son despreciables.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El acuífero es preponderantemente libre y de acuerdo con los cortes litológicos de pozos el subsuelo por el que el agua circula está constituido por los medios poroso y fracturado. El medio poroso está formado por gravas, arenas, arcillas, tepetate arenoso, material aluvial de gravas y arcillas, aglomerado volcánico, toba lacustre, conglomerados de clásticos medios y finos, tobas arcillo arenosas, arena arcillosa, arcilla arenosa, gravas con arcilla, limo y tezontle; y el medio fracturado por andesitas, andesitas alteradas, ignimbritas, riolitas del terciario y basaltos, brechas volcánicas y tobas líticas y vítreas del cuaternario.

No es posible evaluar políticas de manejo del acuífero del valle de Querétaro sin considerar la zona del valle de Obrajuelo, ya que no se tiene evidencia de que este acuífero este separado por medio de una frontera física o hidráulica que permita modelar al acuífero del valle de Querétaro de forma separada de éste.

De acuerdo con el balance de masa realizado para el periodo 1985-1995 se tiene que el acuífero presento en promedio una recarga vertical de $21.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$, recarga horizontal sobre las fronteras de $16.6 \text{ Mm}^3/\text{año}$, extracción por bombeo de $146.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$, descarga horizontal sobre las fronteras de $2.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y un déficit en el acuífero de $110.8 \text{ Mm}^3/\text{año}$ lo que origina un abatimiento promedio anual de 2.7 m y de acuerdo con el modelo calibrado, para el mismo periodo, se tiene en promedio que la recarga vertical fue de $27.6 \text{ Mm}^3/\text{año}$, la recarga horizontal sobre las fronteras de $11.9 \text{ Mm}^3/\text{año}$, la extracción por bombeo de $146 \text{ Mm}^3/\text{año}$, la descarga horizontal sobre las fronteras de $3.6 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y un déficit en el acuífero de $110.1 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

El coeficiente de infiltración estimado en el balance de masa fue de 7 %, la infiltración estimada por el método de los cloruros fue de 4.68 % de la precipitación media anual y el promedio de la infiltración por el balance de agua superficial fue de 4.3 % (Anexo IV). Se puede observar que el valor estimado en el balance de masa es del mismo orden de

magnitud del valor del coeficiente de infiltración estimado por los métodos anteriores. Por otro lado se observa en el análisis de sensibilidad que la recarga vertical es uno de los parámetros que tiene poca sensibilidad en el modelo.

Al realizar la calibración del modelo y comparar los datos de las elevaciones del nivel estático medidos contra los datos simulados se observó en general que el modelo representa la dinámica del acuífero. El error cuadrático medio estimado para los años de calibración fueron los siguientes: para agosto de 1985, fue de 5.9 m; agosto de 1990, fue de 6.2 m y diciembre de 1993, fue de 4.6 m (años de calibración). El error cuadrático medio estimado para los años de validación, diciembre de 1995 y diciembre de 1999 fue de 4.2 m y 6.2 m respectivamente. Se piensa que estos errores no pudieron reducirse debido a la gran heterogeneidad del acuífero y a los confinamientos locales que producen grandes diferencias en los niveles estáticos para pozos vecinos.

Se realizó el análisis de sensibilidad del modelo, variando los parámetros de recarga vertical, conductividad hidráulica y rendimiento específico. El modelo resultó ser más sensible a la variación del rendimiento específico.

Las predicciones que se realizaron para el año 2010 de acuerdo con los cuatro escenarios propuestos indican lo siguiente:

- Si la extracción por bombeo disminuye en un 68 % el acuífero tendría un abatimiento promedio de 9.46 m (0.86 m/año) en el periodo 1999-2010, pero además se observan recuperaciones de 15 m (1.36 m/año) en promedio en la parte central del valle de Querétaro (centro y sur de la ciudad de Querétaro).
- Si la extracción por bombeo disminuye en un 10 % el acuífero tendría un abatimiento promedio de 24.12 m (2.19 m/año) en el periodo 1999-2010, sin presentarse zonas de recuperación.

- Si la extracción del acuífero permanece constante con respecto a la extracción que se tenía para 1999 el acuífero presenta un abatimiento de 27.59 m (2.51 m/año) en el periodo 1999-2010.
- Si la extracción por bombeo aumenta en un 10 % se tendría un abatimiento de 31.10 m (2.83 m/año) en el periodo 1999-2010.

Recomendaciones

Realizar pruebas de bombeo en el acuífero del valle de Querétaro con pozos de observación para estimar el valor del rendimiento específico, ya que este fue el parámetro más sensible en el modelo.

Realizar pruebas de bombeo para estimar la conductividad hidráulica en las zonas en donde no se tiene información de este parámetro, principalmente en las zonas cercanas a las fronteras.

Actualizar el modelo y realizar las predicciones agregando datos de años más recientes para evaluar el comportamiento del acuífero si el proyecto de la presa Extóraz se pone en marcha.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alaniz-Alvarez, Susana Alicia, Ángel Francisco Nieto-Samaniego, María Andrea Reyes-Zaragoza, Ma. Teresa Orozco-Esquivel, Ángel Catarino Ojeda-García, y Luis F. Vassallo, *Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, núm. 2, p. 129-148, 2001.

Anderson, Mary P. y William W. Woessner, *Applied groundwater modeling, Simulation of flow and advective transport*, Academic Press, San Diego California, 1992.

Argus Interware, Inc., User's guide Argus One (Argus Open Numerical Environments), version 4, Jericho, NY, 1997.

ASTM, *Conducting a sensitivity for a groundwater flow model application*. ASTM D 5611-94, 1994.

ASTM, *Calibrating a ground-water flow model application*. ASTM D 5981-96, 1996.

Babu D. K., G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfeld, S. A. Stothoff, *Chemical transport by three-dimensional groundwater flows*, Princeton, N. J., 1997.

Campos Aranda, *Procesos del ciclo hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, San Luis Potosí, S.L.P., 1998.

Comisión Federal de Electricidad, *Manual de obras civiles*, Mexico, 1983.

Comisión Nacional del Agua, *Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos*, México, 1994.

Díaz Nigenda, Juan José, *Simulación numérica del flujo subterráneo en el acuífero del Soconusco, Chiapas*, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.

Eric II, *Extractor rápido de información climatológica v.2.0*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000.

Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., *Estudio geohidrológico integral del Valle de Querétaro y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos*, Comisión Estatal de Aguas, Querétaro, agosto de 1990 – septiembre de 1991.

Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., *Actualización geohidrológica del Valle de Querétaro, Estado de Querétaro*, Comisión Estatal de Aguas, Querétaro, marzo de 1995, APA-CEA-SE-94-08.

Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., *Actualización geohidrológica de los acuíferos del Estado de Querétaro*, Comisión Estatal de Aguas, Querétaro, septiembre de 1995, primera etapa, APA-CEA-SE-95-04.

Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V. *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación en los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro, tomo III*, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, Querétaro, diciembre 1996, GAS-008-PR-96.

Golden Software, Inc., *Surfer 8, User's Guide*, 2002.

Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V., *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de los Apaseos, Guanajuato*, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato, junio de 1998.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Estudio de evaluación de pérdidas de agua en Querétaro*, Coordinación de Tecnología Hidráulica Urbano Industrial, Subcoordinación de Uso Eficiente del Agua en Ciudades e Industrias, Noviembre de 1992.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Estudio Para la Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional del Proyecto Presa Extóraz, Querétaro*, Comisión Federal de Electricidad, 2002.

Lesser y Asociados S.A. de C.V., *Estudio geohidrológico y modelo matemático del acuífero de Los Apaseos*, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato, Noviembre de 1995.

Lesser y Asociados S.A. de C.V., *Estudio isotópico e hidrogeoquímico para la determinación de la relación entre el acuífero del valle de los Apaseos en el estado de Guanajuato y el de Querétaro; así como la influencia de la falla El Salitre*, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato, septiembre de 2000.

Olivarez, José-Luis, *Argus ONE-PTC interface, v.2.2, User Guide*, documentación de la interfaz gráfica distribuida por Research Center for Groundwater Remediation Design (RCGRD), Universidad de Vermont, E.U.A., 2001.

Pinder, George F. *Groundwater modeling, Using geographical information systems*, John Wiley and Sons, Inc., New York, E.U.A., 2002.

Spitz, Karlhein y Joanna Moreno, *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*, John Wiley, New York, 1996.

Universidad Autónoma de Querétaro, *Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro*, reporte técnico, tomos I y II, Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro, 2002.