



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Alternativas de administración racional de recursos hídricos en un acuífero sometido a sobreexplotación: Valle de Toluca, Estado de México

Tesis que para acceder
al grado de doctor
presenta

José Armando Díez Pérez

Director

Dr. Jaime Max Garfias Soliz



Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM

Ciudad Universitaria, Toluca, México, a 11 de mayo de 2009

M. en C.A. JOSÉ ARMANDO DÍEZ PÉREZ
PRESENTE

A continuación transcribo el tema y capitulado aprobado por esta Institución para el desarrollo de su tesis dirigida por el Dr. Jaime Gárfias Soliz del Doctorado en Ingeniería con énfasis en Ciencias del Agua.

"ALTERNATIVAS DE ADMINISTRACION RACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS EN UN ACUÍFERO SOMETIDO A SOBREEXPLOTACIÓN: VALLE DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO."

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II CARACTERÍSTICAS HÍDROGEOLOGICAS DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA
CAPÍTULO III MODELACIÓN DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
CAPÍTULO IV PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO PARA LA ADMINISTRACIÓN RACIONAL EN EL SISTEMA ACUÍFERO
CAPÍTULO V CONDICIONES HÍDROGEOLOGICAS DEL ACUÍFERO, ESTABLECIMIENTO DEL MODELO Y SU CALIBRACIÓN
CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE ADMINISTRACIÓN RACIONAL DEL RECURSO HÍDRICO
CAOÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA

Asimismo, para la aprobación de la tesis y demás trámites deberá sujetarse al reglamento respectivo de esta Institución.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2009, Año del Siervo de la Nación, José María Morelos y Pavón"


DR. DAVID DE LEÓN ESCOBEDO
DIRECTOR

FACULTAD DE INGENIERÍA
U.A.E.M.

AGRADECIMIENTOS

Se debe este trabajo a muchas personas y organizaciones. En primer lugar, el reconocimiento principal, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que mediante la beca con No de Registro 71054 hizo posible esta investigación.

A todas las personas del Centro Interamericano del Agua que aportaron datos e ideas, pero en especial al director de la tesis, Dr. Jaime Gárfias Soliz, quien a través de algunos de los trabajos dirigidos, como éste, ha ganado un sitio especial en el firmamento universitario y en el religioso, por su paciencia.

Debo mencionar a dos amigos, cuyo trato y aprecio inicié en esta labor de investigación, los doctores Carlos Solís Morelos y Arturo Colín Cruz, a quienes debo, además de sus enseñanzas, el impulso para terminar este trabajo.

En la Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua se tuvo siempre una amable y pronta atención a nuestras solicitudes de información. Agradecemos especialmente a los ingenieros Eduardo Mejía Pedrero y Sergio Murillo Cuevas.

Finalmente, lo más importante, mi esposa quien me ha acompañado en este largo trayecto, que de veras ha sido largo...

Resumen

Se presentan antecedentes de la situación del uso del agua en el centro de México así como los problemas derivados de la escasez, la cual se debe, además del clima, al crecimiento industrial y de población que ha ocurrido en esa zona. El caso es más crítico en la Cuenca del Alto río Lerma. En ella se origina el mencionado río, en el Valle de Toluca y su acuífero está sobreexplotado pues suministra agua a la capital del estado de México, zonas aledañas y a la Ciudad de México. El objetivo de la investigación es obtener una propuesta de alternativas de administración racional de un acuífero de una manera que permita su explotación de una manera integral. Se plantea el empleo del modelo *MODFLOW* apoyado por el sistema de información geográfica *IDRISI*. Se definió un modelo conceptual en el que se introdujo toda la información disponible del acuífero y con él se estableció el modelo matemático de flujo. A éste se le efectuó la calibración, eligiendo los parámetros geohidrológicos y las condiciones de frontera más indicados. Posteriormente se verificó el modelo y se procedió a su aplicación en predicción, para lo cual se definieron escenarios u horizontes de planeación que incluyeron sobre todo aspectos demográficos. Todas las predicciones se efectuaron en cuatro etapas de cinco años cada una, del año 2005 al 2025. Los escenarios se elaboraron mediante cálculos de demanda que parten de pronósticos de población del Consejo Nacional de Población. El primer escenario plantea continuar la explotación al mismo ritmo que la tasa actual, de 213 litros de agua por persona por día (L/p/d); el segundo, con la reducción del consumo a 150 L/p/d y el tercero disminuyendo aún más el consumo, a 100 L/p/d. Después de estos escenarios se plantearon algunos más, que incluyeron: uno con el consumo actual (213 L/p/d) y un desplazamiento de pozos, redistribuyendo algunos del centro de la cuenca al N, de E a O y de la cercanía de Toluca hacia el N. Con el mismo consumo, en otro escenario se desplazan pozos y se suprime la totalidad de la extracción correspondiente al Sistema Lerma. Finalmente se realizaron los procesos denominados: escenario *ideal* (combinación de: consumo de 100 L/p/d, desplazamiento de pozos y supresión total del Sistema Lerma) y escenario *factible*, menos complicado de aplicar (simultáneamente: consumo de 150 L/p/d, desplazamiento de pozos y extracción a la mitad en el Sistema Lerma). Se presentan como resultado configuraciones de alturas piezométricas de las simulaciones hasta el año 2025 de todos los escenarios antes descritos. Además se muestra la sobreexplotación del acuífero en un diagnóstico con gráficas en el tiempo de niveles y de cambios en la dirección del gradiente vertical en los multipiezómetros. En las configuraciones resultado de los procesos son evidentes los abatimientos del nivel piezométrico que ocurren en la porción este del acuífero, donde se inició la explotación del agua para la Ciudad de México; también aparece una anomalía en el NO de Toluca y en el centro de la cuenca, donde se localizaba la zona industrial. Debido a su menor dificultad social y política, la opción de administración racional *factible* es una propuesta interesante de administración para el acuífero.

Abstract

The situation and water use problems in central Mexico is presented, as well as scarcity problems originated by climate, industrial and population growth. The situation is especially critical in the Alto Lerma Basin, where the Lerma river originates in the Valle de Toluca. The Valle de Toluca aquifer is overexploited because it supplies water for consumption to Toluca City, capital of Mexico state, where there is an important industrial development, and also to neighboring areas and to Mexico City. The objective of the investigation is to obtain a proposal of rational administration alternatives in an aquifer to attain an integrated exploitation. The use of the *MODFLOW* model supported by the Geographical Information System *IDRISI* is proposed as a solution to the aquifer administration. A conceptual model is defined using all aquifer information and based on it was established the mathematical flux simulation model. The model was calibrated in order to choose the best geohydrologic parameters and border conditions. After the verification of the model the prediction steps were defined by planning scenarios which included mainly demographic aspects. The prediction were made in four five-years steps each, from year 2005 to 2025. The horizons demanded calculations were based on the population prediction elaborated by the Consejo Nacional de Población. The first horizon proposes to continue water exploitation at the same rhythm as the current one, i.e. water amount per inhabitant of 213 liters per person per day (L/p/d); a second one establishes a water consumption reduction to 150 L/p/d and a third one, reducing still more the consumption to 100 L/p/d. More horizons were made after those ones including one at the current rate (213 L/p/d) and a displacement of some wells redistributed from the center to the North, from East to West and from the neighbourhoods of Toluca to the North. Another scenario with the same consumption rate, proposes displacing wells and eliminating all Sistema Lerma well extraction. Finally two simulations were made: the *best one* (ideal option: 100 L/p/d consumption, redistributing some wells and taking away all water extraction from Sistema Lerma) and the *feasible one*, less difficult on its application (150 L/p/d consumption, displacing extraction wells and water extraction at half rate in the Sistema Lerma wells). The result from processing the model time is a series of configuration pictures of water piezometric heights from all simulation scenarios, from year 2005 to 2025. Besides, the aquifer overexploitation is shown in a diagnostic with multipiezometric time-level and depth change gradient graphs. In the configuration series obtained by processing water, piezometric level lows are located in the East aquifer zone, where the water exploitation to Mexico City began; also a piezometric anomaly at the Northeast of Toluca City and at the basin center, where the industrial zone was located, is shown. The best rational administration policy for the aquifer is the *feasible one*, because it has less social and political difficulty.

Índice

Capítulo I

Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Administración racional y gestión sustentable de los recursos hídricos	4
1.3. Una administración racional aplicada a la gestión del agua	7
1.4. Objetivos general y particulares de la investigación	8
1.5. Descripción de la tesis	9

Capítulo II

Características hidrogeológicas del sistema acuífero del valle de Toluca	12
2.1. Introducción	12
2.2. El agua en México	13
2.3. Cuenca Alta del río Lerma	18
2.4. Acuífero del Valle de Toluca	28
2.5. Delimitación de la cuenca y del acuífero	33
2.6. Información geológica	34
2.6.1. Geología superficial	34
2.6.2. Geología estructural	36
2.6.2.1. Sistema de fallas Taxco-Querétaro (NNO SSE)	36
2.6.2.2. Sistema de fallas San Antonio (NE-SO)	36
2.6.2.3. Sistema de fallas Tenango (E-O)	37
2.6.3. Geología de subsuelo	37
2.6.4. Geología histórica	39
2.6.5. Datos geológicos obtenidos de pozos	47
2.7. Información geofísica	50
2.8. Discusión de la información geológica y geofísica	58
2.9. Información geohidrológica	62
2.9.1. Información de pozos productores	62
2.9.2. Multipiezómetros	64
2.9.3. Condiciones de sobreexplotación en el acuífero	65
2.9.3.1. Alteraciones en el flujo superficial	65
2.9.3.2. Cambios en el sentido del flujo subterráneo	68

Capítulo III

Modelación de flujo de aguas subterráneas	75
3.1. Introducción	75
3.2. El modelado	76
3.3. La aplicación de la administración racional	78
3.4. Aplicaciones de administración racional a acuíferos	81

Capítulo IV

Planteamiento metodológico para la administración racional en el sistema acuifero 85

4.1. Introducción.....	85
4.2. Diagnóstico del estado del acuifero.....	86
4.3. El modelado de flujo y la administración racional.....	86
4.4. Modelo conceptual.....	89
4.5. Establecimiento del modelo de flujo.....	90
4.5.1. Zona de operación del modelo.....	90
4.5.2. Determinación del tamaño de malla y el número de capas.....	91
4.5.3. Análisis de los pozos de extracción.....	93
4.5.4. Análisis de la información climática.....	94
4.5.5. Definición de los parámetros geohidrológicos.....	94
4.5.6. Condiciones de frontera.....	98
4.5.7. Balance hidrológico del acuifero.....	102
4.5.8. Calibración del modelo de flujo.....	104
4.6. Análisis de alternativas de administración racional del sistema acuifero.....	106
4.6.1. Información demográfica.....	107
4.6.2. Determinación de las demandas de agua.....	107
4.6.3. Procesamiento para obtener las alternativas.....	108

Capítulo V

Condiciones hidrogeológicas del acuifero, establecimiento del modelo y su calibración 110

5.1. Introducción.....	110
5.2. Diagnóstico del estado del acuifero.....	111
5.2.1. Abatimiento de los niveles piezométricos en el acuifero.....	112
5.2.2. Modificaciones en los flujos verticales.....	113
5.2.3. Configuración de los gradientes hidráulicos.....	124
5.3. Modelo conceptual.....	131
5.4. Definición de la zona y del tamaño de malla para el modelo.....	133
5.5. Pozos de extracción.....	133
5.6. Información climática.....	137
5.7. Parámetros geohidrológicos.....	137
5.7.1. Coeficiente de infiltración.....	137
5.7.2. Conductividad hidráulica en el modelo.....	139
5.7.3. Porosidad y coeficiente de almacenamiento propuestos.....	142
5.8. Condiciones de frontera.....	144
5.8.1. Condición de Altura piezométrica General.....	144
5.8.2. Instalación de una condición de Dren.....	146
5.8.3. Estimación de la recarga superficial al acuifero.....	146
5.8.4. Evapotranspiración en el acuifero.....	147
5.9. Balance hídrico.....	148
5.10. Proceso de calibración.....	154
5.10.1. Primera calibración.....	161
5.10.2. Segunda calibración.....	165
5.10.3. Tercera calibración.....	165
5.14. Resultados de las simulaciones de flujo.....	166

Capítulo VI

Análisis de las alternativas de administración racional del recurso hídrico174

6.1. Introducción	174
6.2. Información demográfica	175
6.3. Determinación de demandas de agua	177
6.4. Predicción de flujo mediante el modelo	183
6.4.1. Verificación (primea etapa: 1950-1968) del modelo	187
6.4.2. Verificación (segunda etapa: 1969-1984) del modelo	188
6.4.3. Verificación (tercera etapa: 1985-2005) del modelo.....	189
6.5. Simulaciones de los escenarios 2005-2025.....	193
6.5.1. Primera simulación (cuarta etapa) 2005-2010	195
6.5.2. Segunda simulación (quinta etapa) 2011-2015	199
6.5.3. Tercera simulación (sexta etapa) 2016-2020	199
6.5.4. Cuarta simulación (séptima etapa) 2021-2025	200
6.6. Simulación de escenarios de mejora para el acuífero	210
6.6.1. Redistribución de pozos en el Valle de Toluca	210
6.6.2. Mitigación del abatimiento piezométrico en las cercanías de La Teresona	211
6.6.3. Resultados de los escenarios de mejora desplazando pozos	212
6.6.4. Análisis del escenario en el que se suprime el Sistema Lerma	212
6.6.5. Análisis del escenario ideal para la administración racional del acuífero.....	215
6.6.6. Análisis del escenario factible para la administración racional del acuífero.....	215
6.7. Análisis de las alternativas de administración racional.....	218

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones.....230

Bibliografía 235

Índice de figuras

Figura 2.1. De planta de ventosas con sobre explotación	12
Figura 2.2. Perfil actual de la ciudad alta de México	17
Figura 2.3. Diagrama y principales parámetros	20
Figura 2.4. Perfil actual de la ciudad	21
Figura 2.5. Ubicación de pozos del modelo	21
Figura 2.6. Diagrama de flujo del sistema	22
Anexos	
(En disco)	
Anexo A. Pozos de extracción usados en la calibración del modelo	25
Anexo B. Cálculo de la recarga lateral al acuífero	28
Anexo C. Cálculo de la recarga superficial en el acuífero	28
Anexo D. Proyección de la población en el D.F. y en la República Mexicana	30
Anexo E. Proyección de demanda de agua en los municipios	34
Anexo F. Datos empleados en las calibraciones	35
Anexo G. Pozos de extracción en el modelo	36
Anexo H. Variación de la población entre 1960 y 1970	37
Anexo I. Cálculo de las extracciones en diciembre 1968	38
Anexo J. Pozos de extracción del censo 1984-1985	39
Anexo K. Consumo de agua total y por habitante	40
Anexo L. Desplazamiento de extracciones para disminuir abatimientos	42
Figura 3.1. Características de nivel piezométrico a 30 m en 2003	44
Figura 3.2. Valores que se dieron en la zona	48
Figura 3.3. Mapa del modelo conceptual	49
Figura 3.4. Multiplicadores de calibración en el modelo	110
Figura 3.5. Evolución del nivel en las sondas del pozo PL-105	106
Figura 3.6. Evolución de las lecturas de niveles en las sondas del PL-207	117
Figura 3.7. Nivel en piezómetros en el pozo PL-140	118
Figura 3.8. Evolución de los niveles del pozo piezométrico PL-156	119
Figura 3.9. Gradientes verticales del PL-140	120
Figura 3.10. Gradientes verticales de las sondas del PL-106	121
Figura 3.11. Gradientes hidrostáticos verticales del pozo PL-112	122
Figura 3.12. Gradientes hidrostáticos verticales del pozo PL-125	123
Figura 3.13. Gradientes de los piezómetros entre 30 y 40 m en 1968	127
Figura 3.14. Gradientes en los piezómetros entre 30 y 40 m en 1990	128
Figura 3.15. Gradientes en los piezómetros entre 30 y 40 m en 1992	129
Figura 3.16. Gradientes en los piezómetros entre 30 y 40 m en 2003	130
Figura 3.17. Diagrama de flujo de la precipitación	138
Figura 3.18. Características de la planta de captación por pozos de sondas	141
Figura 3.19. Esquema del modelo con dimensiones de celdas de 750 m	152
Figura 3.20. Esquema de la zona y perfil del área TP16 hasta el 2012	158
Figura 3.21. Volumen de flujo subterráneo que sale de la cuenca	164
Figura 3.22. Ajuste del modelo al modelo	172
Figura 4.1. Mapa de la zona de estudio con los municipios involucrados	182
Figura 4.2. Curvas de igual altura del nivel piezométrico, etapa entre 1960-1968	190
Figura 4.3. Curvas de nivel piezométrico, etapa entre 1969-1984	191
Figura 4.4. La línea de abscisa piezométrica en los años 1985-2003	197

Índice de figuras

Figura 2-1. Ubicación de acuíferos con sobreexplotación.....	22
Figura 2-2. Perspectiva de la cuenca alta del río Lerma.....	27
Figura 2-3. Orografía y principales poblaciones.....	29
Figura 2-4. Perfil geológico de la cabecera de la cuenca.....	30
Figura 2-5. Ubicación de pozos del sistema Lerma.....	31
Figura 2-6. Isolíneas de elevación al nivel estático en 1992.....	32
Figura 2-7. Mapa de geología superficial.....	35
Figura 2-8. Trazos de las fallas que se distinguen en la imagen.....	43
Figura 2-9. Dirección del perfil geológico.....	44
Figura 2-10. Perfil geológico de la zona.....	45
Figura 2-11. Ubicación de los perfiles de la empresa ARIEL.....	53
Figura 2-12. Perfil geológico AA'.....	54
Figura 2-13. Perfiles geológico BB'.....	55
Figura 2-14. Perfil geológico DD'.....	56
Figura 2-15. Información geológico-geofísica empleada.....	57
Figura 2-16. Croquis del total de los pozos con datos.....	66
Figura 2-17. Estaciones meteorológicas y multipiezómetros.....	67
Figura 2-18. Datos hidrométricos de la estación Atenco.....	71
Figura 2-19. Flujo subterráneo y zonas de inundación históricas.....	72
Figura 2-20. Configuración del nivel piezométrico a 100 m en 2005.....	73
Figura 2-21. Configuración de nivel piezométrico a 150 m en 2005.....	74
Figura 4-1. Variables que se deben considerar.....	88
Figura 4-2. Esquema del modelo conceptual.....	92
Figura 5-1. Multipiezómetros localizados en el valle.....	115
Figura 5-2. Evolución del nivel en las sondas del pozo PL-106.....	116
Figura 5-3. Evolución de las lecturas de niveles en las sondas del PL-202.....	117
Figura 5-4. Evolución piezométrica en el pozo PL-140.....	118
Figura 5-5. Evolución de los niveles del pozo piezométrico PL-156.....	119
Figura 5-6. Gradientes verticales del PL-145.....	120
Figura 5-7. Gradientes verticales de las cinco sondas del PL-106.....	121
Figura 5-8. Gradientes hidrométricos verticales del pozo PL-144.....	122
Figura 5-9. Gradientes hidrométricos verticales del pozo PL-126.....	123
Figura 5-10. Gradientes de los piezómetros entre 20 y 40 m. en 1968.....	127
Figura 5-11. Gradientes en los piezómetros entre 20 y 40 m en 1980.....	128
Figura 5-12. Gradientes en los piezómetros entre 20 y 40 m en 1992.....	129
Figura 5-13. Gradientes en los piezómetros entre 20 y 40 m en 2005.....	130
Figura 5-14. Distribución de la precipitación.....	138
Figura 5-15. Conductividad de la primera capa con prueba de bombeo.....	141
Figura 5-16. Entramado del modelo con dimensión de celda de 750 m.....	152
Figura 5-17. Esquema de las tapas a partir del año 1950 hasta el 2025.....	158
Figura 5-18. Volumen de flujo subterráneo que sale de la cuenca.....	159
Figura 5-19. Ajuste definitivo al modelo.....	172
Figura 6-1. Borde de la zona VT con los municipios incluidos.....	182
Figura 6-2. Curvas de igual altura del nivel piezométrico, etapa entre 1950-1968.....	190
Figura 6-3. Curvas de nivel piezométrico, etapa entre 1969-1984.....	191
Figura 6-4. Isolíneas de alturas piezométricas en los años 1985-2005.....	192

Figura 6-5. Alturas piezométricas al año 2010 con 213 L/p/d.....	196
Figura 6-6. Alturas piezométricas al año 2010 con 150 L/p/d.....	197
Figura 6-7. Alturas piezométricas al año 2010 con 100 L/p/d.....	198
Figura 6-8. Alturas piezométricas al año 2015 con 213 L/p/d.....	201
Figura 6-9. Alturas piezométricas al año 2015 con 150 L/p/d.....	202
Figura 6-10. Alturas piezométricas al año 2015 con 100 L/p/d.....	203
Figura 6-11. Alturas piezométricas al año 2020 con 213 L/p/d.....	204
Figura 6-12. Alturas piezométricas al año 2020 con 150 L/p/d.....	205
Figura 6-13. Alturas piezométricas al año 2020 con 100 L/p/d.....	206
Figura 6-14. Alturas piezométricas al año 2025 con 213 L/p/d.....	207
Figura 6-15. Alturas piezométricas al año 2025 con 150 L/p/d.....	208
Figura 6-16. Alturas piezométricas al año 2025 con 100 L/p/d.....	209
Figura 6-17. Alturas piezométricas en 2025 con 213 L/p/d y movimiento de pozos.....	213
Figura 6-18. Alturas piezométricas en 2025 con 213 L/p/d y sin S.Lerma.....	214
Figura 6-19. Alturas piezométricas en 2025 con propuesta Ideal.....	216
Figura 6-20. Alturas piezométricas en 2025 con propuesta Factible.....	217
Figura 6-21. Proporción entre la extracción de los tres horizontes.....	226
Figura 6-22. Ampliación de la salida del modelo en el año 2005.....	227
Figura 6-23. Ampliación de la salida del modelo en el año 2025.....	228
Figura 6-24. Ampliación de la salida aplicando desplazamiento de pozos.....	229

Cuadro 5-10. Valores de los parámetros de calibración.....	197
Cuadro 5-11. Recarga superficial sobre el área del acuífero. Primera calibración.....	197
Cuadro 5-12. Nuevo balance del acuífero.....	198
Cuadro 5-13. Conductividad hidráulica resultado de las calibraciones.....	198
Cuadro 5-14. Coeficientes de almacenamiento resultado de las calibraciones.....	198
Cuadro 5-15. Último ajuste a los coeficientes de conductividad hidráulica.....	199
Cuadro 5-16. Balance después del ajuste final al modelo.....	199
Cuadro 6-1. Población en los municipios del Valle de Toluca.....	180
Cuadro 6-2. Proyección de población total de los municipios 2010-2025.....	181
Cuadro 6-3. Número de pozos por organización y por zona.....	185
Cuadro 6-4. Extracción de los pozos en el Valle de Toluca.....	186
Cuadro 6-5. Extracción por organización y por zona.....	186

Índice de cuadros

Cuadro 2-1. Uso del agua en México.....	15
Cuadro 2-2. Clave de información geológica del perfil.....	46
Cuadro 3-1. Temas por considerar en la administración racional.....	84
Cuadro 4-1. Valores generales de porosidad.....	97
Cuadro 4-2. Valores de coeficientes de almacenamiento para acuíferos libres.....	97
Cuadro 4-3. Unidades de medida empleadas en modelo numérico.....	109
Cuadro 5-1. Conductividad hidráulica en el Valle de Toluca.....	140
Cuadro 5-2. Pozos con datos de prueba de bombeo en el Valle de Toluca.....	140
Cuadro 5-3. Valores de las porosidades iniciales asignadas en el modelo.....	143
Cuadro 5-4. Valores de coeficientes de almacenamiento en el Valle de Toluca.....	143
Cuadro 5-5. Valores de coeficientes de almacenamiento propuestos.....	143
Cuadro 5-6. Recarga que ocurre en la zona de montaña.....	145
Cuadro 5-7. Resumen del cálculo de recarga en la zona del acuífero.....	148
Cuadro 5-8. Balances anteriores del acuífero Valle de Toluca.....	150
Cuadro 5-9. Balance de la cuenca para el año 2005.....	153
Cuadro 5-10. Etapas de los procesos de calibración.....	157
Cuadro 5-11. Recarga superficial sobre el área del acuífero. Primera calibración.....	162
Cuadro 5-12. Nuevo balance del acuífero.....	163
Cuadro 5-13. Conductividad hidráulica resultado de las calibraciones.....	166
Cuadro 5-14. Coeficientes de almacenamiento resultado de las calibraciones.....	166
Cuadro 5-15. Último ajuste a los coeficientes de conductividad hidráulica.....	169
Cuadro 5-16. Balance después del ajuste final al modelo.....	171
Cuadro 6-1. Población en los municipios del Valle de Toluca.....	180
Cuadro 6-2. Proyección de población total de los municipios, 2010-2025.....	181
Cuadro 6-3. Número de pozos por organización y por usos.....	185
Cuadro 6-4. Extracción de los pozos en el Valle de Toluca.....	186
Cuadro 6-5. Extracción por organización y por usos.....	186

Capítulo I

Introducción

1.1. Antecedentes

Es cada vez más apremiante la necesidad de administrar adecuadamente y con visión el recurso agua, que escasea no sólo en México, sino en todo el mundo y a futuro será aún más comprometido el poder acceder a su uso. Esta consciencia ha sido de lento aprendizaje para la humanidad, pues en muchos lugares se desperdicia o emplea mal el agua. Las experiencias de administración del agua en México no han sido precisamente ejemplares a lo largo de la historia. Además, el país tiene la particularidad de que en una gran parte de su territorio escasea el vital líquido. La ubicación de la Cuenca Alta del río Lerma, en el centro del país, la ha hecho particularmente vulnerable; errores históricos hicieron que fuesen secadas las lagunas de Lerma, fuente del mismo río. Posteriormente, a partir del año 1950 se procedió a la extracción de gran cantidad de agua con el fin de surtirla, para su consumo, a la Ciudad de México. Además por estar próxima a la gran urbe, la cuenca ha sido elegida como receptora de grandes volúmenes de población y de industria, las cuales que se han incrementado grandemente en las últimas décadas. Existen dudas y preocupación sobre el desempeño y futuro del

acuífero si se continúa su explotación al mismo paso que se ha venido haciendo. Afortunadamente con el fin de efectuar la administración de acuíferos se dispone de experiencias y herramientas muy poderosas para normar criterios y estrategias.

Entre las herramientas mencionadas en el párrafo anterior está la información captada desde satélite artificial, que además plantea alarmas importantes para el destino de la humanidad entera, como la desaparición de la capa de ozono en la alta atmósfera y el tema más reciente de las consecuencias del calentamiento de la atmósfera, que se hacen evidentes en el deshielo de las zonas polares y en la desaparición de glaciares en las montañas. En un aspecto más particular, es muy variada la información que han proporcionado los satélites artificiales para el descubrimiento y aprovechamiento de recursos naturales, pero es en el aspecto meteorológico donde han surgido los avisos más oportunos para el salvamento de vidas humanas. Prácticamente ningún reporte meteorológico serio puede ignorar el cuadro que presenta el estado de la atmósfera captado desde el espacio, como se aprecia diariamente en los noticiarios de la televisión. Un detalle interesante es que gracias a la Organización Meteorológica Mundial, organismo de Naciones Unidas (ONU), la captación y uso de todos estos datos atmosféricos, que son abundantes, es gratuita y está al alcance de cualquier persona. Pero además, esta información procedente del espacio es de gran utilidad para el estudio de los recursos naturales. Son abundantes los estudios realizados empleando los datos procedentes de los satélites de la serie LANDSAT, de la NASA (*National Aircraft and Satellite Administration*) de Estados Unidos, antes denominada ERTS, cuya información está disponible desde el año 1973.

Igualmente, todo ello ha permitido avances inimaginables en todos los aspectos de la vida de la población, así como en el desarrollo de la computación. Uno de ellos es el modelado de los fenómenos naturales, con el que se logran aspectos como simulación y predicción a futuro de los mismos, con el fin de aplicarles una administración más eficiente. La adaptación de los procesamientos de las grandes computadoras a los microprocesadores ha permitido, a su vez, avances afortunados, inimaginables hasta hace algunos años.

Se percibe que los estudios hechos a la fecha sobre la mencionada Cuenca Alta del río Lerma carecen de una definición de las unidades de las que se extrae el agua y es necesario formular una propuesta sobre la mejor distribución de los aprovechamientos y flujos de extracción, así como de un conocimiento de la potencialidad de la zona como suministradora de agua. Para ofrecer una alternativa de administración para un acuífero es fundamental tener una visión completa de su funcionamiento y de los fenómenos que lo afectan. De esta manera es posible prever su futuro ante eventuales emergencias.

Esta necesidad lleva al empleo de modelos, en especial del tipo simulación, que permiten la realización de predicciones en el tiempo. A estos modelos se les pueden inducir, como tendencia rectora, los planteamientos de manejo sostenible o sustentable, lo que significa conservar los recursos para que sigan estando disponibles para las generaciones futuras; este concepto, como principio de administración, se presenta a continuación y se expone más adelante con mayor extensión.

De acuerdo con Wang y Anderson (1982), un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad. De acuerdo con los mismos autores, un mapa de carreteras puede ser considerado un modelo útil para representar la realidad. En este punto encaja el uso que se da al modelado de simulación de flujo en este trabajo, porque “los modelos de acuíferos son también representaciones de la realidad y contruidos apropiadamente pueden ser herramientas de predicción valiosas para la administración de los recursos del agua subterránea”.

Entre los diferentes tipos de modelos se ha escogido el *MODFLOW*, que es un modelo matemático de simulación que realiza la solución de las ecuaciones diferenciales de flujo, basadas en el principio de D'Arcy, mediante el método de las diferencias finitas.

El modelo *MODFLOW* fue desarrollado primero en el USGS (United States Geological Survey) de Estados Unidos y ha sido mejorado y adaptado a microcomputadora por la empresa Waterloo Hydrogeologic (Waterloo Hydrogeologic, 1995-2003). A este

sistema actualizado se le denomina *Visual Modflow* y es usado en casi todo el mundo por su facilidad y versatilidad (Kashaigili *et al.*, 2003).

Además del modelo *MODFLOW*, en la investigación que se presenta se emplea como auxiliar un sistema de información geográfico (SIG), el *IDRISI*, desarrollado en la Universidad de Clarke (Eastman, 2003a). El SIG facilita manipulaciones, transformaciones, manejo de los datos referenciados y la presentación de datos geográficos en microcomputadora, siendo a su vez un efectivo complemento para la adecuación y el uso de la información cartográfica, al igual que de las imágenes captadas por los satélites.

1.2. Administración racional y gestión sustentable de los recursos hídricos

Aunque con anterioridad se alzaban voces que llamaban la atención sobre la conservación del ambiente, que en nuestro medio se cobijaba bajo el término “ecológico”, el concepto de desarrollo sostenible o sustentable puede rastrearse a partir del año 1972, en la llamada Conferencia sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo, Suecia (Provencio y Carabias, 1993). En 1983, Naciones Unidas estableció la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo encabezada por Gro Harlem Brundtland. A partir de entonces al grupo se le conoció como Comisión Brundtland. En 1987 la Organización de Naciones Unidas publicó el documento “Nuestro Futuro Común”. En este documento los expertos en recursos naturales plantearon la “sostenibilidad” o “sustentabilidad” como una explotación de éstos, que mejorara el bienestar de la humanidad a corto plazo, sin afectar local ni globalmente al ambiente; lo más importante es que la explotación no afecte el goce del recurso por las generaciones futuras.

Posteriormente, en la reunión cumbre convocada por Naciones Unidas en Río de Janeiro (1992), se estableció el compromiso de todos los países miembros a propugnar el Desarrollo Sustentable. Esta acción se consideraba una alternativa para evitar el agotamiento de los recursos naturales no renovables, la viabilidad de los renovables para

satisfacer el desarrollo económico y social, evitar la acelerada extinción de especies tanto animales como vegetales y permitir mejores condiciones de vida, en el futuro, para la humanidad. Otra llamada de atención más reciente, en particular sobre la escasez del agua, tuvo lugar en la ciudad de Kioto (UNFCCC, 2003).

A partir de la divulgación del concepto, el término es mencionado en diversos documentos de Naciones Unidas, especialmente de la UNESCO. Es importante tener presentes las dificultades que se observan en su aplicación debido a diversos factores como tradiciones y costumbres, los grandes intereses económicos y el ambiente general establecido por la globalización en el mundo moderno. Pero es indiscutible que tiene ventajas, pues: “Hace unas décadas prevalecía la idea de un mundo lleno de recursos inagotables; en la actualidad esta visión positiva se ha venido abajo. H. Daly lo plantea con toda claridad cuando percibe que la economía humana ha pasado de una era en la que la acumulación del capital (capital hecho por el hombre) era el factor que limitaba el desarrollo económico, a otra en la que el factor limitante es lo que resta del capital natural. Según la lógica económica se debería maximizar la productividad de este factor cada día más escaso y tratar de aumentar su disponibilidad. Por ende, la política económica debería ser diseñada para incrementar el capital natural y su volumen” (Escobar, 2007).

Lo que propugna el Informe Brundtland (1987) es una forma de conjugar el desarrollo económico sin destruir el ambiente y que favorezca tanto a los países industrializados como a los países en desarrollo. El concepto es: “*desarrollo sustentable*, es decir, capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las futuras en la satisfacción de las que les serán propias” (Mayor, 1987).

En este sentido, desarrollo sustentable, manejo óptimo (Ahlfeld y Mulligan, 2000) o manejo sustentable supone una administración racional (que es lo que importa en este trabajo) mediante la consideración y la aplicación simultánea de varios conceptos y acciones, básicamente:

- *Uso de las tecnologías más adecuadas* en el manejo de los recursos naturales, de manera que el aprovechamiento del recurso sea óptimo y no provoque daños al ambiente.
- *Crecimiento económico* que ocurra en la comunidad que posee y explota el recurso.
- *Bienestar social* generado mediante el desarrollo del recurso natural.
- *Conservación de la calidad del ambiente*: que no ocurra contaminación debido a las acciones de explotación.
- *Consideración de la equidad social*. En principio, todo lo referente a manejo racional o sustentable partió de la idea de redistribución, repartición de los beneficios de acuerdo con el trabajo y las necesidades.
- *Democracia*. Es importante que se tomen en cuenta las opiniones de todos los miembros de la comunidad.
- *Cuidadosa administración de los recursos naturales*. Se espera que no ocurran desperdicios ni reprocesos que los produzcan.

Aunque el planteamiento tuvo una raíz económica, la preocupación por el aumento demográfico, el mayor índice de pobreza y el deterioro de recursos naturales a partir de la premisa del uso de las tecnologías más adecuadas se ubicó como tema prioritario en la UNESCO, donde se propugnó la necesidad de definir las mejores tecnologías para el desarrollo o manejo de los recursos naturales y de realizar su difusión, para aplicarse sobre todo en los países en desarrollo. En estos países el desarrollo sustentable “enfrenta dificultades derivadas de su aplicación a disímiles y muy complejos contextos regionales que exigen soluciones específicas” (SEMARNAT, 1997).

El manejo sostenible tiene, desde su origen, la dificultad de ser un concepto general,¹ de buenas intenciones pero de difícil aplicación, con base en el impedimento que ponen los actores vigentes, que han obtenido ganancias gracias al menor gasto que han hecho en la extracción de los recursos naturales, al poco cuidado en su aprovechamiento integral y al descuido en su transporte y almacenamiento; todo ello produce pérdidas y desperdicios al desembarazarse de los desechos, que en muchas circunstancias podrían ser

reutilizados. Paradójicamente, mientras más escaso ha sido un recurso en el hogar, con más dispendio e inconsciencia se usa de manera no apropiada. En las calles de las ciudades se observa que las personas originarias de localidades sin agua corriente son las que usan el chorro de la manguera para mover el polvo y la basura, en lugar de barrer con la escoba tradicional.

No obstante, muchos de los aspectos mencionados son comunes a sociedades desarrolladas y en vías de desarrollo. Es lógico que en las primeras el gasto de energía, la generación de desechos y el consumo de agua per cápita sea mucho mayor que en las segundas. Pero a estos factores, que suelen calificarse de correspondientes a la pobreza, se agregan, en los países en vías de desarrollo, puntos que hacen más complicada la aplicación de los conceptos de administración racional, tales como una mayor corrupción administrativa, ignorancia generalizada sobre la situación de los recursos naturales y casi siempre carencia de un marco legal efectivo.

En México, para las políticas de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAT, 1997), el desarrollo sustentable es un principio de “política institucional”, entendiéndolo como un “proceso de largo alcance con base en el reconocimiento de una necesaria interdependencia entre el crecimiento económico, la conservación de la calidad del ambiente y la equidad social”. En el país la política ambiental se basa en varios principios, entre los que destaca el de que el desarrollo debe realizarse en armonía con la naturaleza.

Se ha pretendido tener en cuenta todos estos conceptos para realizar este trabajo, que después de elaborar un diagnóstico del acuífero plantea un método de administración racional del mismo.

1.3. Una administración racional aplicada a la gestión del agua

El planteamiento de la aplicación del concepto de administración racional a los acuíferos se utiliza en casi todos los países para paliar la disminución de los volúmenes disponibles de agua. Esta disminución ocurre en la totalidad del agua dulce, en recursos

tanto superficiales como subterráneos. El agua, un recurso tan vital y escaso en el mundo, tiene todavía un aspecto propio, de escasez en las naciones en desarrollo, además de un problema de calidad: "...millones de personas en los países en desarrollo carecen de agua potable sana" (Cosgrove y Rijsberman, 1998).

La administración debe ser racional, el desarrollo sostenible o sustentable del recurso –el cuerpo de agua subterránea en este caso particular- de tal manera que su explotación se realice sin comprometer los requerimientos para las generaciones futuras. El abordar un recurso hídrico, implica antes que nada la consideración de todos los componentes que participan en el ciclo hidrológico, ya que están estrechamente vinculados.

En la administración del agua subterránea en Gran Bretaña (Alley *et al.*, 1999) se consideran las prioridades de: sostener, a largo plazo, las extracciones de agua, utilizarla efectivamente y conservar su calidad, preservar el ambiente e integrar el agua subterránea y la superficial a un sistema de administración ambiental.

1.4. Objetivo general y particulares de la investigación

De acuerdo con el problema de sobreexplotación que existe en el acuífero del Valle de Toluca, el objetivo de esta investigación es obtener una propuesta de alternativas de administración racional en un acuífero sometido a extracción excesiva, que permita su explotación de una manera integral; ello con la idea de sentar las bases que hagan factible, si cabe, la integración de los recursos subterráneos con los superficiales, la mejor adecuación de sitios de recarga, natural y artificial, que implica asimismo el aspecto ambientalista de no erradicar totalmente los remanentes de las lagunas que ocupaban parte de la zona. Esta propuesta presenta las diferentes alternativas de explotación, así como sus consecuencias, mediante la predicción realizada al aplicar un modelo de simulación de flujo, sin considerar parámetros de contaminación que, aunque sí existen, no han sido el motivo de este trabajo.

Como objetivos particulares se plantean la recopilación de toda la información sobre la zona, los datos hidrológicos, hidrogeológicos e históricos, así como una cuidadosa

revisión de los mismos y también investigar la estratigrafía en el acuífero, actualizando sus valores a la luz de los últimos estudios y resultados. Otro objetivo particular es diseñar un modelo conceptual del funcionamiento del acuífero. Este modelo conceptual se utiliza para establecer y aplicar un modelo matemático de simulación de flujo del acuífero del Valle de Toluca.

El modelo tuvo la intención de conocer mejor el acuífero y realizar predicciones a futuro de su probable funcionamiento, definidas mediante diferentes escenarios de administración. Estos escenarios incluyeron distintos horizontes de planeación que abarcan aspectos demográficos, económicos y ambientales.

1.5. Descripción de la tesis

En este trabajo, donde en el capítulo I se abordan algunas consideraciones sobre la Cuenca del Alto río Lerma, la importancia del agua y su uso en México.

En el capítulo II se presenta una descripción detallada de la información disponible sobre una parte de la Cuenca del Alto río Lerma, el Valle de Toluca y su acuífero. En esta descripción se expone la información geológica, geofísica y geohidrológica de este acuífero, de la cual se deduce su problemática actual.

En el capítulo III se revisa lo que se denomina “estado del arte” de la tecnología que se plantea para la propuesta de solución: el empleo del modelado matemático aunado a una mejor administración, que básicamente consiste en la idea de manejar el recurso de una manera racional de modo que, sin agotarlo, lo puedan disfrutar las generaciones futuras. En este capítulo se amplía el paradigma de Gro Brutland (1987), fundamental en enfoques ambientales, para su aplicación a un acuífero y finalmente se trata del uso del modelado para conocer mejor el recurso y disponer de una herramienta que permita una administración más racional. El objetivo último propugna, mediante la instalación de un modelo matemático, que una buena administración del acuífero permita la administración racional de la cuenca, con su población y la economía asociada.

En el capítulo IV se describe la metodología del trabajo que se sigue en esta tesis. Se describen la etapa del diseño del modelo conceptual, fundamental en planteamiento y desarrollo y las tareas que conducen al establecimiento del modelo de flujo, como la determinación de la zona de aplicación, la definición del tamaño de la malla o rejilla y del número de capas que poseerá la aplicación del sistema. También se abordan en este capítulo las operaciones conducentes a la definición de los coeficientes geohidrológicos y las condiciones de borde o de frontera que caracterizan el procesamiento que se realizará en el computador.

En el capítulo V se expone un diagnóstico del estado del acuífero; mediante los datos de los multipiezómetros disponibles se ilustra el estado de los abatimientos puntuales, las modificaciones que han tenido los flujos verticales y algunas configuraciones de los gradientes hidráulicos. Se describe el modelo conceptual y a partir de él, las etapas seguidas en el establecimiento del modelo, que ya se han bosquejado en el capítulo anterior. Se utilizan los datos de la extracción de agua que aparecen en los censos de los aprovechamientos disponibles, facilitados por personal de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2003) en el Estado. Como uno de los objetivos ha sido elaborar una herramienta que pudiese ser útil para el consejo de cuenca, se optó por emplear los datos cartográficos y la información climática generada y disponible en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) (Quentín *et al.*, 2004). En esta etapa se utilizó información geohidrológica de la bibliografía y de estudios anteriores para la determinación de los parámetros geohidrológicos. En este mismo capítulo se describe el establecimiento de las condiciones de frontera y culmina con el procedimiento de calibración del modelo, consistente en una serie de procesamientos previos, que dan por resultado una optimización de los parámetros del modelo se que exponen en este capítulo. Se describen tres de las calibraciones realizadas.

En el capítulo VI se efectúa, a partir de la información demográfica, el establecimiento de las demandas de agua a futuro para la definición de las extracciones pertenecientes a uso urbano, que fundamentarán las predicciones del modelo. En esta programación se utilizaron datos de censos de población del INEGI, así como la información de las

proyecciones de población para los diferentes períodos de tiempo, obtenidas del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2007). El procesamiento del modelo se efectuó en siete etapas, las tres primeras de verificación y las otras de simulación de predicción de escenarios. Las etapas de verificación abarcan de 1950 a 1968, de 1969 a 1984 y de 1985 a 2005, año en que empiezan las etapas de predicción. Estas cuatro últimas etapas, a intervalos de cinco años entre el 2005 y el 2025, se generaron con tres posibilidades u horizontes: el primero, de continuar con la extracción actual; el segundo, disminuirla un 30% aproximadamente en el consumo urbano y el tercero, disminuirla aún más, a un consumo diario por habitante de 100 litros por persona día (L/p/d). Se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los procesamientos mediante las configuraciones de las alturas piezométricas productos del modelo. En el capítulo se realiza un análisis y la discusión de los resultados.

En el capítulo VII se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la tesis y al final del trabajo se presenta en orden alfabético la bibliografía citada en él.

En una última sección, de anexos, se presenta una síntesis de los datos que fueron empleados en el desarrollo de la investigación, los cuales se consideró conveniente separar del texto principal por tratarse de datos o detalles de algún procedimiento. En el desarrollo de la tesis son citados oportunamente estos 12 anexos.

Capítulo II

2.1. Introducción

El agua es el fundamento de la vida, debido a que cada vez es más escasa y a las crecientes de su demanda, su administración y su uso se han convertido en una de las preocupaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Se menciona con frecuencia la posibilidad de que estallen de guerra por la posesión del agua. En un documento de la ONU se menciona que el agua es un recurso vital para el desarrollo económico y social, para la producción de energía, la agricultura, riego, industria, salud pública y es un elemento esencial del ambiente global.

Características hidrogeológicas del sistema acuífero del valle de Toluca

Con su estructura geológica que tiene comportamientos hidrogeológicos especiales, el agua ha permitido la vida y sus procesos. Además de ser fundamental para sus mismos procesos, la proporción de la humedad de la corteza terrestre es esencial para la vida.

Este capítulo empieza con una exposición del estado del agua en México a fin de detallar la importancia del agua subterránea y particularizar la situación que guarda este recurso en la cuenca alta del Alto Lerma, donde nace el mencionado río. La cuenca está dividida en subcuenca Ixtlahuaca-Atlacomulco al Norte y subcuenca del Valle de Toluca, al Sur.

La cuenca superficial del Valle de Toluca yace sobre el acuífero objeto de este estudio. En este capítulo se revisa la información geológica, geofísica y geohidrológica disponible sobre el acuífero y se presentan los aspectos más relevantes de los temas mencionados. En primer lugar, se da información de geología superficial, estructural e histórica, que ha tenido avances relevantes en los últimos años, junto con una revisión

actualizada. En aspectos de subsuelo se emplean algunos datos de pozos y de los estudios geofísicos regionales y locales que se han hecho sobre la cuenca. Se detallan los inventarios de aprovechamientos o pozos de extracción existentes y se termina el capítulo con una presentación del estado de la piezometría que se realiza en el acuífero, mediante una red de multipiezómetros.

2.2. El agua en México

El agua es el fundamento de la vida; debido a que cada vez es más escasa y a las carencias en el mundo, su administración y su uso se han convertido en una de las preocupaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Se menciona con frecuencia la posibilidad de que estallen de guerras por la posesión del agua. En un documento de una organización mundial (OMM/UNESCO, 1991) se expresaba que: “El agua es, como el aire que respiramos, un requerimiento básico para toda la vida en la Tierra, plantas, animales y la humanidad. Es vital para muchos aspectos del desarrollo económico y social, para la producción de energía, la agricultura, suministro doméstico e industrial y es un componente crítico del ambiente global.”

Con su estructura molecular, que tiene comportamientos fisicoquímicos especiales, el agua ha permitido la vida y sus procesos. Además de ser fundamental para esto último y para la conservación y prosperidad de la humanidad, lo es también para la civilización. Procesos como el transporte y la manufactura han sido posibles gracias al agua. Es necesario considerar, además, que el agua dulce es un recurso valioso y escaso. El agua aprovechable para su consumo por los seres vivos de la Tierra (es decir el agua no salobre) representa tan sólo el 2% del total. De este volumen de agua dulce, en la superficie de los continentes habitados está sólo el 0.4%, pues en los glaciares se localiza 68.7% y en el permafrost 0.8%. Queda como la gran reserva mundial el agua subterránea, que representa el 30.1% de ese total (National Geographic Maps, 2002) y de ella se tratará más adelante.

Federico Mayor, Director General de la UNESCO, comentó en el Segundo Coloquio Internacional sobre Hidrología y Manejo de los Trópicos Húmedos en Panamá (1999):

“El agua y la civilización son inseparables: las más tempranas culturas surgieron en los valles de los grandes ríos Éufrates, Nilo, Indo y Yangtzé, y hoy en día el futuro de la civilización depende del uso racional de este recurso finito y vulnerable.”

Actualmente, en nuestras sociedades existen crecientes dificultades para el suministro de agua y esta situación llegará a ser en el futuro aún más complicada debido al crecimiento de la población. El agua es cada vez más apreciada y más nos vale que así sea. Es un recurso que cada día se vuelve más difícil de obtener y el que hay disponible está perdiendo calidad. Todo lo que se haga en pro de la conservación y el mejor uso del agua es importante, no sólo para una comunidad y un país, sino para toda la humanidad. En el Foro del Agua que se llevó a cabo hace unos años en KIOTO (2003), en la declaración final hubo expresiones en el sentido de que urge una mejor cooperación entre las naciones para compartir los recursos hidráulicos y buscar la mayor participación de la ONU para que tome un papel líder en mediar, conducir y cooperar con las otras organizaciones involucradas en el sector del agua. Recientemente, también en las Naciones Unidas, de acuerdo con Montaigne (2002) se comentó que 2.7 millones (2,700 millones) de seres humanos carecerán de agua en el año 2025 si el consumo de ésta continúa al mismo ritmo que hoy. Los temores acerca de un futuro difícil se originan del crecimiento proyectado de la población mundial de más de 6,000 millones actualmente, a un estimado de 9,000 millones en el año 2050. Se presenta otra verdad incontrovertible: “Sin embargo, la cantidad de agua en la Tierra no se incrementa” (Montaigne, 2002).

Es interesante observar el balance del uso del agua que se hace en nuestro país: con 4,986 m³ por habitante al año, la disponibilidad de agua en México es 20 veces menor que en Canadá, 10 veces menor que en Brasil y de la mitad que en Estados Unidos; sin embargo, es dos veces mayor que la disponibilidad por habitante que tiene China y cuatro veces mayor que la de Egipto (Millán, 2002).

Se estima que en México se consumen 43.7 km³ de aguas superficiales al año y 28.5 km³ de aguas subterráneas; también se calcula una pérdida de 9 km³ por evaporación de las

presas y cuerpos de agua superficiales (CBAM, 2002). En cuanto a la distribución del uso del agua en nuestro país (Cuadro 2.1), datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2002) señalan que el mayor consumo lo realiza el sector agrícola, seguido del consumo público (urbano-poblacional) y el industrial, con montos similares.

El agua en México, donde está disponible en los hogares, tiene un costo bajo, por lo que el desperdicio es común. Además en general se carece de una cultura de conservación y uso óptimo. La disponibilidad es precaria en 60% del territorio, donde apenas excede los 1,100 m³ por habitante al año (CESPEDES y CMIC-DF, 2001).

Cuadro 2.1. Uso del agua en México

Uso	Subterránea (km ³ /año)	Superficial (km ³ /año)
Agrícola	19.2	37.0
Público	5.7	2.6
Industrial	3.6	2.5
Pecuario	0.0	1.6

Fuente: CNA (2002).

En cuanto a los costos del agua para los usuarios, aspecto de suma importancia, se observa lo siguiente:

- La recaudación de todos los sistemas de agua potable en el país durante el año 2001 alcanzó sólo 16,000 millones de pesos.
- La recaudación obtenida por la compra de agua embotellada, en cambio, fue de 13,000 millones de pesos en ese mismo año.
- La recaudación por la compra de refrescos y cervezas fue de 207,000 millones de pesos en 2001 (Alcaraz, 2002).

Puede observarse el bajo costo del agua en México al ver que la cantidad total recaudada por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2002b) en el año 2000 fue de únicamente 6,120 millones de pesos. Un cálculo sencillo a partir de esta cifra proporciona 0.08 pesos por metro cúbico de agua, lo que es una cantidad irrisoria cuando se la compara con el costo en el mercado de una botella de refresco o de agua natural. A las consideraciones anteriores, hay que añadir que el país está ubicado en las mismas latitudes que los grandes desiertos del mundo, lo que da como resultado que dos tercios del territorio sean áridos o semiáridos. El agua en el centro de México, una meseta a más de 500 metros sobre el nivel del mar (msnm) donde vive el 80% de los habitantes, es poco abundante. Igualmente, el mismo documento pone en evidencia un hecho que preocupa a todos los planificadores: la actividad económica se presenta en las áreas donde el agua es más escasa, ya que “sólo 28% de la escorrentía ocurre donde vive 77% de la población” (CNA, 1999).

Hasta la fecha, la solución para obtener agua de buena calidad y bajo costo ha sido el aprovechamiento del agua subterránea. En la principal urbe del país, la Ciudad de México, se estima que existen 5,000 pozos (CESPEDES y CMIC-DF, 2001). La sobreexplotación del acuífero en el Valle de México es la causa del hundimiento del terreno, entre otros efectos. El hundimiento ha producido daños a construcciones y en especial rupturas de las redes de agua potable y de drenaje.

El agua subterránea, ese 30.1% ya mencionado de líquido no salobre, tiene grandes ventajas: “Históricamente el agua subterránea ha sido una fuente confiable, limpia y prácticamente ilimitada para una buena parte de la población mundial” (Ahlfeld y Mulligan, 2000). Además de que proporciona un agua limpia en términos generales, donde de manera excepcional pueden presentarse contaminantes naturales o artificiales, tiene la ventaja de que se dispone de ella prácticamente en el lugar de uso, evitándose costosas plantas de tratamiento, tuberías que la transporten largas distancias y todo lo que signifique una inversión cuantiosa.

El agua subterránea existe casi dondequiera debajo de la superficie de la Tierra (Willis y Yeh, 1987) en lugares con las condiciones adecuadas para su acumulación. Casi todos los acuíferos superficiales (los que están a menos de 100 m de profundidad) contienen agua apropiada (con menos de 1,500 mg/L de sólidos totales disueltos) para el uso humano (Cherry, 1987).

El alto consumo del agua subterránea, no es de extrañar: “El subsuelo es la fuente de agua potable para mucha gente alrededor del mundo, especialmente en zonas rurales. En los Estados Unidos el agua subterránea constituye la fuente de 42.1% de la población” (Fetter, 1999). En Canadá, casi el 40% de los municipios, con cerca de 2.2 millones de personas (Cherry, 1987), depende del agua subterránea en una proporción significativa de su suministro de agua. Se estima que dos tercios de la población rural de dicho país reciben en sus hogares agua subterránea.

Las ventajas del uso del agua subterránea junto con la necesidad de agua para una mayor población han provocado la explotación intensiva de muchos acuíferos, con las consecuencias negativas de degradación de los mismos. La mayor preocupación por el ambiente y la experiencia en la explotación de los acuíferos son las razones para prestar una mayor atención a estos “aspectos negativos del desarrollo” (Custodio, 2000).

En México, debido a la alta demanda de agua, el agua subterránea está siendo bombeada en una cantidad aproximada de 8 km³ al año. Se menciona que los 100 acuíferos

sobreexplotados proporcionan el 50% del agua extraída para todos los usos (CNA, 1999). En la Figura 2.1 con base en la carta de acuíferos con sobreexplotación e intrusión salina que publicó la Comisión Nacional del Agua en 2002, se presenta la porción Centro y Norte, entre la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, donde se concentra en mayor grado la sobreexplotación.

En la Figura 2.1 es evidente que la sobreexplotación se acentúa en el Norte, zona semidesértica, pero también ocurre en gran medida en la parte central del país, donde ocurre la mayor concentración de población e industria, debido a las ventajas ya mencionadas del agua subterránea. La mayor concentración de acuíferos sobreexplotados se localiza entre las dos cordilleras, la Sierra Madre Oriental y la Occidental, principalmente en los estados de Aguascalientes, Coahuila, Chihuahua, Guanajuato, Distrito Federal, Querétaro, San Luis Potosí y Nuevo León y el Estado de México.

La sobreexplotación producida en el desarrollo de los acuíferos mexicanos trae una serie de consecuencias negativas como el incremento de los costos de extracción por el abatimiento de los niveles. La sobreexplotación origina además de la mengua del acuífero, secuelas negativas como: hundimientos del terreno, afallamientos, agrietamientos, etc. Todos estos efectos se presentan en la misma Ciudad de México, en ciudades del Bajío, como Celaya y Querétaro y en el valle de Aguascalientes, donde el municipio ya ha procedido a instalar instrumentación para medir los agrietamientos.

En el centro del país se ubica, entre las cuencas de agua subterránea marcadas como sobreexplotadas, la del río Lerma, que es una de las más importantes por su longitud y las entidades que atraviesa. En esta cuenca se asientan poblaciones grandes y una alta concentración de fuentes productivas.

2.3. Cuenca Alta del río Lerma

El río Lerma nace en el Estado de México, en la Región Hidrológica número 12 de la CNA, en la Cuenca Alta del río Lerma. La altura promedio en el valle es de 2,600

msnm y la máxima corresponde al volcán Nevado de Toluca o Xinantécatl. Los acuíferos de dicha cuenca alta se encuentran entre los sobreexplotados. Al acuífero de la porción sur se le denomina Acuífero Valle de Toluca. El río Lerma nace en las estribaciones del Nevado de Toluca y sierras circundantes tomando un curso con rumbo Norte y después de la ciudad de Toluca, capital del Estado de México, sigue una dirección NO, pasando su cauce, antes de abandonar el Estado, entre dos estrechamientos, provocados por la cercanía de las sierras.

Se estima que en la zona de la Cuenca Alta del río Lerma habitan 3 millones de personas (INEGI, 2000), que dependen totalmente del suministro de agua subterránea para su consumo. Existe un desarrollo agrícola e industrial muy marcado en el corredor industrial de la ciudad de Toluca, donde existen grandes fábricas, sobre todo de la industria del ramo automotriz, sus componentes y derivados, así como de la elaboración de cerveza.

De acuerdo con datos censales, la población compuesta por los municipios de Toluca, Mexicalcingo, Ocoyoacac y Xonacatlán, situados en esta región del Estado, creció de 138,442 habitantes en 1950 a 652,739 en 1995 (CNA, 1996). También según datos de INEGI, la población urbana del Estado (la que reside en localidades con 2,500 o más habitantes) pasó de representar 62.3% del total de la población en 1970, a 83.1% en 1990, lo que da una idea del incremento poblacional que tiene la zona.

Su cercanía a la gran urbe, la Ciudad de México, selló el destino de la Cuenca Alta del río Lerma: en la cuenca vecina, la gran cantidad de pozos perforados provocó hundimientos y pérdida de calidad del agua (Legorreta, 1997), por lo que fue necesario llevar agua de la cuenca del Lerma, proyecto iniciado en 1942 y que entró en operación a principios de la década de 1950. El agua subterránea procedente de los acuíferos del Alto Lerma ha sido, desde entonces, una de las fuentes principales de suministro para la Ciudad de México y la zona conurbada (con una población de más de 20 millones de habitantes), además de ser el líquido que se surte a las poblaciones ubicadas en el mismo Valle de Toluca.

El entorno de la Cuenca Alta del río Lerma depende del agua subterránea para su suministro, pero también es muy importante la porción extraída del acuífero que desde 1942 (Sabalcagaray, 1981) es conducida a la Ciudad de México. Este proceso empezó con la toma del agua de los manantiales naturales y después, en 1951, con la instalación de una batería de pozos y un acueducto (UAEM, 1993). Se estima que los pozos de la Cuenca Lerma contribuyen aproximadamente con $6 \text{ m}^3/\text{s}$ al suministro de la Ciudad de México (Legorreta, 1997), pero al principio de la década de 1970 el aporte de la cuenca del Lerma alcanzaba los $14 \text{ m}^3/\text{s}$ (Silva, 1999). Al respecto resaltan los siguientes hechos: “El déficit del líquido en la ciudad es cada vez más alto. ¿Cuánta agua recibe la ciudad de México al día? 35,000 litros por segundo. Al día se pierden por fugas mil 209 millones 600 mil litros. Traer agua de los sistemas Lerma y Cutzamala tiene un costo de 13 millones 608 mil pesos diarios” (Alcaraz, 2002).

En la Cuenca Alta del río Lerma se repite el proceso de deterioro ambiental que ocurrió en Tenochtitlán: extracción de agua (en este caso para llevarla a la Ciudad de México), secado de las lagunas y sobreexplotación del acuífero. Desde el año en que se inició el traslado de agua a la cuenca vecina se notó una drástica caída en el caudal del río Lerma, asociada a la desaparición de los manantiales y las lagunas (Díez, 1998) y desde luego con las consecuencias para todo el cauce siguiente. En la antigua estación hidrométrica Atenco, la primera estación en el cauce, localizada a la salida de lo que fue la primera laguna, se presentan, desde 1951 caudales muy bajos, prácticamente nulos durante el estiaje, cuando el flujo de agua es más reducido (Díez, 1998). Dada la importancia del acuífero, a fin de establecer propuestas que garanticen su administración racional y por lo tanto su conservación y permanencia para las futuras generaciones, se plantea la realización de este trabajo de investigación mediante la aplicación de un sistema de modelado geohidrológico, como un proceso que se explica más adelante.

En cuanto al clima general en la zona, la temperatura media está por debajo de los 13°C y la precipitación media anual oscila entre los 600 y los 1,800 mm. La máxima incidencia ocurre en el mes de julio, con un valor que fluctúa entre 150 y 160 mm. De acuerdo con la carta climatológica 1:500,000 (INEGI, 1990), el mes con máxima

precipitación es julio, seguido por junio, agosto y septiembre en ese orden, aunque existen precipitaciones durante todo el año. La sequía se registra entre diciembre y febrero, con valores menores a 10 mm. Predomina el clima templado o mesotérmico (INEGI, 1987). La Cuenca Alta del río Lerma se caracteriza por una baja temperatura y una precipitación alta sobre las sierras.

En la Figura 2.2 se muestra una simulación de vista panorámica de una parte de la Cuenca Alta del río Lerma. Se aprecian las alturas de las sierras y la zona baja de humedales por la que transcurre el río. Se observa el desarrollo agrícola y Toluca, en el centro del Valle. La figura, obtenida mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), que será de gran utilidad en este trabajo, combina datos de imagen de satélite LANDSAT y datos de altitud del terreno del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). La exageración vertical manifiesta la gran altura del volcán Nevado de Toluca, ya mencionada, así como la de las sierras situadas al oriente, sobre el valle circunvecino. En la imagen, los tonos oscuros del valle indican humedad y los cuerpos de agua aparecen en negro. Resalta la zona baja por la que transcurre el flujo del río Lerma. Las flechas señalan las direcciones del flujo superficial. La cuenca tiene forma de herradura con su abertura hacia el NO. El cauce del río fue rectificado en los dos últimos siglos (Camacho, 1995), toma primero la dirección N y después sigue una curva hacia el NO.

La conformación de la cuenca y un croquis general de la misma se aprecian en la Figura 2.3, formada igualmente con datos del INEGI de altitud y la banda 4 del mapeador temático del satélite Landsat. En esta imagen se muestra el Nevado de Toluca y las sierras que conforman la cuenca, cuya altitud se presenta en un tono más oscuro. La cuenca del río Lerma es más alta que las cuencas vecinas, al oriente la del Valle de México y al S, la del río Balsas. Al oriente se localiza la Sierra de Las Cruces, que separa el Valle de Toluca, la ciudad de Toluca está en el centro, del Valle de México, en el cual se ubica la ciudad más grande del mundo.

Figura 2.1. a) Acuíferos con sobreexplotación entre la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Occidental. Se destacan los acuíferos del centro del país. b) Acuífero de la cuenca del río Lerma, sus principales componentes y la zona de estudio de estudio. Fuente: Modificado de CIA (1992).

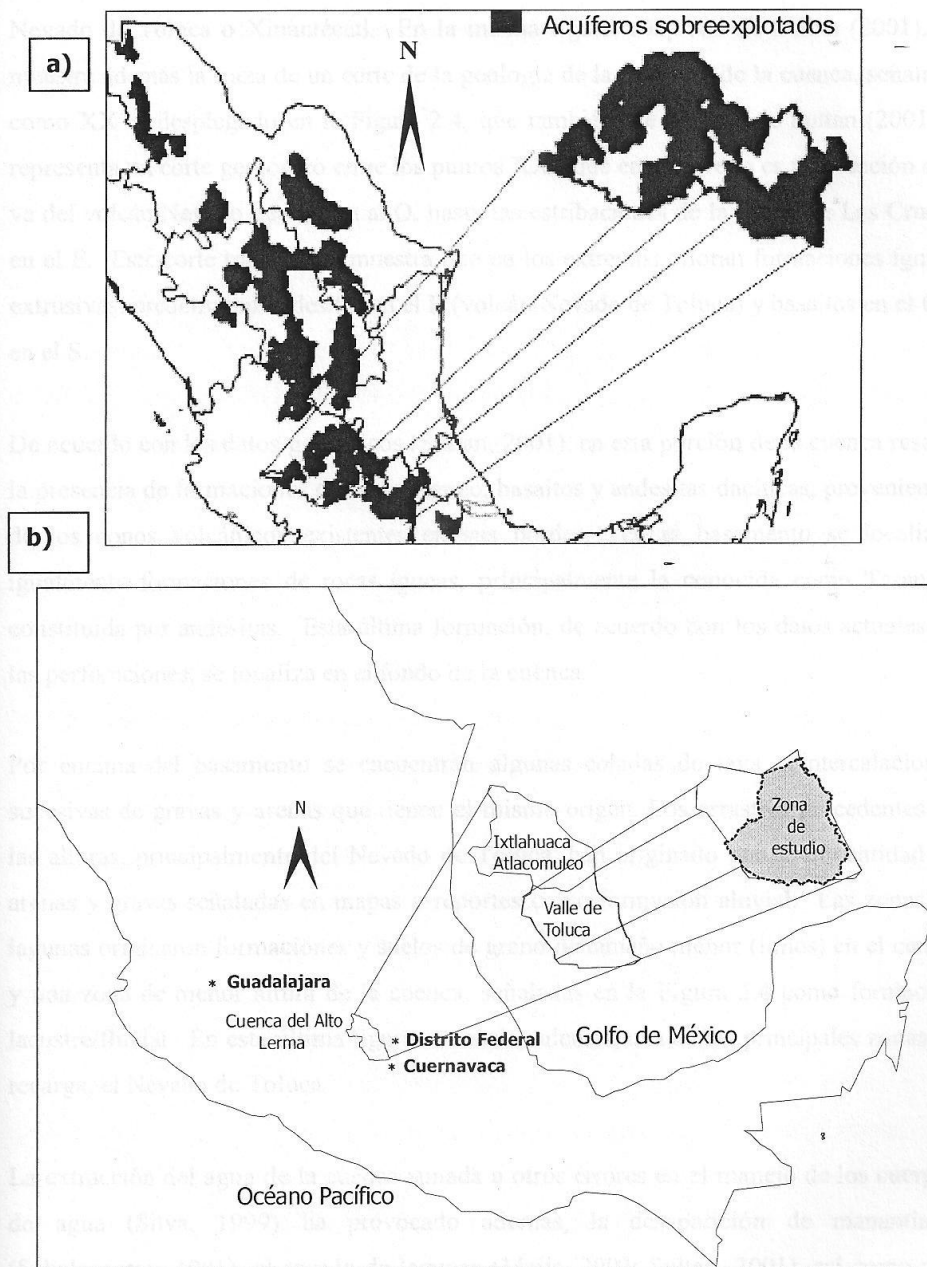


Figura 2.1. a) Acuíferos con sobreexplotación entre la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental. Se destacan los acuíferos del centro del país. b) Acuífero de la cuenca del Alto Lerma, sus dos componentes y la zona de estudio definida. Fuente: Modificado de CNA (2002).

La altura promedio en el valle es de 2,600 msnm y la máxima corresponde al volcán Nevado de Toluca o Xinantécatl. En la misma figura, adaptada de Sultan (2001), se muestra además la traza de un corte de la geología de la cabecera de la cuenca, señalado como XX' y desplegado en la Figura 2.4, que también fue tomada de Sultan (2001) y representa un corte geológico entre los puntos XX', que en el terreno es una sección que va del volcán Nevado de Toluca al O, hasta las estribaciones de la Sierra de Las Cruces en el E. Este corte transversal muestra que en los extremos afloran formaciones ígneas extrusivas: predominan andesitas en el E (volcán Nevado de Toluca) y basaltos en el O y en el S.

De acuerdo con los datos geológicos (Sultan, 2001), en esta porción de la cuenca resalta la presencia de formaciones de origen ígneo, basaltos y andesitas dacíticas, provenientes de los conos volcánicos existentes en sus bordes; en el basamento se localizan igualmente formaciones de rocas ígneas, principalmente la conocida como Tarango, constituida por andesitas. Esta última formación, de acuerdo con los datos actuales de las perforaciones, se localiza en el fondo de la cuenca.

Por encima del basamento se encuentran algunas coladas de lava e intercalaciones sucesivas de gravas y arenas que tienen el mismo origen. Los arrastres procedentes de las alturas, principalmente del Nevado de Toluca, han originado una gran cantidad de arenas y gravas señaladas en mapas y reportes como formación aluvial. Las zonas de lagunas originaron formaciones y suelos de grano de tamaño menor (limos) en el centro y una zona de menor altura de la cuenca, señaladas en la Figura 2.4 como formación lacustre/fluvial. En esta última figura se señala, además, una de las principales zonas de recarga, el Nevado de Toluca.

La extracción del agua de la cuenca aunada a otros errores en el manejo de los cuerpos de agua (Silva, 1999) ha provocado además, la desaparición de manantiales (Sabalcagaray, 1981), el secado de lagunas (Mejía, 2002; Sultan, 2001), así como una serie de daños ambientales (Albores, 1995; Díez, 1998), que involucran también conflictos sociales y perjuicios económicos (Silva, 1999). Se dispone de la historia y de

las razones (Camacho, 1995) que originaron este desastre ecológico y sus efectos. Como consecuencia de la extracción del subsuelo han ocurrido abatimientos de niveles en los acuíferos y diversos aspectos adversos, como incremento de la contaminación en el acuífero (LESSER, 1992).

La batería de pozos, administrada por el Departamento del Distrito Federal (DDF) al oriente, fue la primera en alimentar el suministro de agua a la Ciudad de México a mediados del siglo XX (Figura 2.5). La intención era extraer el líquido de la zona más baja de la cuenca, donde era más abundante. El margen del área lagunar se extendía desde donde nacía el río hasta el N de la población de Lerma. Por ello al grupo de pozos que suministran agua al oriente se le denomina Sistema Lerma. El primer cuerpo de la zona de lagunas, ahora de inundación, denominada Chignahuapan es propiamente el inicio del río. Al principio de este corredor existía el manantial más famoso de la zona, en la población de Almoloya del Río.

De acuerdo con datos de la Gerencia de la Comisión Nacional del Agua en el Estado de México, en los sistemas Lerma y Norte existen 795 pozos. De estos pozos en la actualidad cerca del 50% de la extracción del sistema se envía al Distrito Federal (D.F.). Se estima que se extraen $9.1 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales $5.4 \text{ m}^3/\text{s}$ se conducen al D.F. y unos $3.7 \text{ m}^3/\text{s}$ se utilizan en el mismo Valle de Toluca (Mejía, 2003a). Según Mejía (2003b), del total de 795 pozos, el agua de 404 de ellos es de uso público urbano, 172 pozos se dedican a la industria, 162 al riego agrícola, 31 a servicios y 26 a otros usos no especificados.

Se aprecia que en la cuenca está invertido el orden del consumo: de ordinario, en los usos de agua, es mayor el agrícola, seguido del industrial y finalmente del urbano. En este caso el urbano es mayor, por la cantidad de agua que se envía, en las cantidades mencionadas, a la Ciudad de México; los usos industrial y agrícola cuentan con un número similar de aprovechamientos.

De acuerdo con la CNA (1996), la recarga se estima en $330 \text{ Mm}^3/\text{año}$, provenientes del Nevado de Toluca, de la Sierra de las Cruces y de la recarga vertical. Los volúmenes de extracción por medio de pozos y norias se estiman en 327.38 millones de m^3 (menos que los 353.9 del año 1970) y la evapotranspiración, en $22 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Conforme a este estudio citado, el cambio en el almacenamiento del acuífero es de -19.38 millones de m^3 al año. Esto evidencia una situación de sobreexplotación prolongada.

Se han llevado a cabo estudios y diagnósticos sobre el Valle y el acuífero. Se ha mencionado el de LESSER (1992), que presenta abundantes configuraciones piezométricas del acuífero, así como los de BASIN (1993) y UNITECNIA (1996). En el primero se plantea la hipótesis de que el agua, al precipitarse sobre las montañas y el valle, en una gran proporción se dirige al acuífero, donde tienen lugar dos flujos subterráneos, uno que se dirige del O hacia el E y el NE hasta el borde oriental del Valle y otro en dirección contraria, desde la Sierra de Las Cruces hacia el área intermedia, al O, donde se localizaban las antiguas lagunas.

En la Figura 2.6 pueden apreciarse las elevaciones del nivel estático en el año 1992. Básicamente se observa un abatimiento en las proximidades de la ciudad de Toluca, a lo largo de cuyo corredor industrial, en el Paseo Tollocan (que es en realidad la prolongación de la carretera Toluca-Distrito Federal), se ubica una gran cantidad de pozos cuya extracción se dedica al consumo de las industrias situadas en esa zona.

De acuerdo con Silva (1999), algo que queda claro en la historia de la explotación tanto del río Lerma como del acuífero es la ignorancia sobre su funcionamiento. Los acontecimientos en la zona han estado plagados de sinrazones, como la creencia colonial en que la insalubridad era originada por los cuerpos de agua lagunares y de casualidades, fuera del control humano, como la súbita desaparición de la laguna de Chignahuapan, a fines de 1961, cuando: “llegaron noticias alarmantes de los habitantes de Almoloya del Río que vieron desaparecer la laguna en grandes oquedades” (Mosser, 1962).

En general, la extracción de agua ha seguido en las últimas décadas criterios puramente políticos a favor de exportar el agua a la Ciudad de México. Igualmente, el mismo autor Silva (1999) comenta que hasta el año 1925 se tenía un total desconocimiento del comportamiento del río.

La cuenca del Alto Lerma queda escindida en dos subcuencas (Figura 2.1), drenadas por el mismo río. Se denomina como Valle de Toluca a la subcuenca situada en la porción al S, donde tiene su origen el río, con las aguas que escurren de las zonas altas y se asientan en las lagunas antes mencionadas. Por lo tanto el acuífero que yace bajo ella tiene el mismo nombre. La otra subcuenca, situada al N, es denominada de Ixtlahuaca-Atlacomulco, en relación con las dos poblaciones grandes ubicadas en esa porción del Estado de México; la salida del río hacia el estado de Michoacán ocurre por el estrechamiento Atlacomulco. Ambas subcuencas se unen en el denominado estrechamiento Perales.

En este último valle la principal población es Toluca, que aglutina en la actualidad una extensa zona conurbada. Es el acuífero de esta zona al que se hará referencia en lo sucesivo en este trabajo.

Los estudios realizados hasta la fecha sobre el Valle de Toluca carecen de una definición de las unidades de las que se extrae el agua, de una propuesta sobre la mejor distribución de los aprovechamientos, de flujos de extracción así como de un conocimiento de la potencialidad de la zona como suministradora de agua.

Es fundamental tener una visión clara del futuro del acuífero. Estas razones inducen al planteamiento del estudio del acuífero aplicando conceptos de administración racional, sustentable o sostenible, ideas que se describen más adelante.

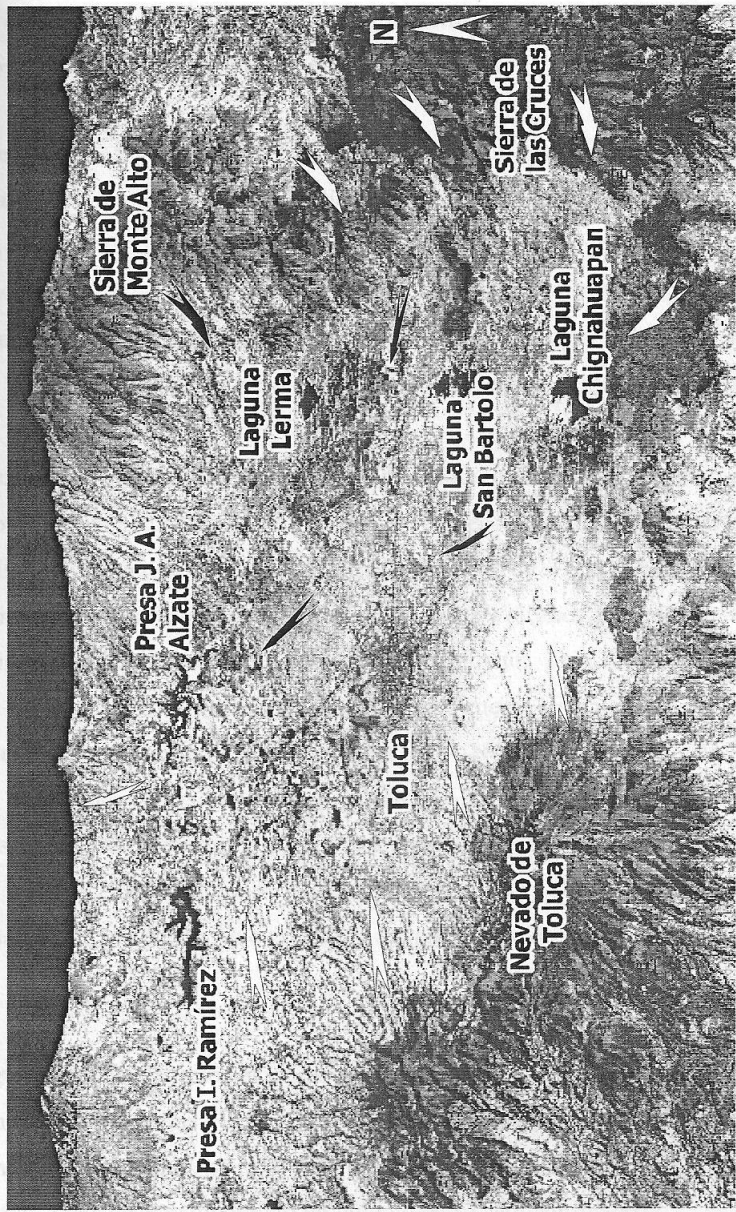


Figura 2.2. Perspectiva del Valle de Toluca basándose en una imagen LANDSAT. Las flechas indican la dirección de los escurrimientos. Al centro la ciudad de Toluca y la carretera al Distrito Federal. Al E la zona de lagunas, origen del río Lerma. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Acuífero del Valle de Toluca

Antes de realizar un modelo matemático que simule un acuífero es importante tener claras las ideas, la disposición y el comportamiento del mismo que servirán de base para los cálculos que se efectuarán en el computador.

En este proceso, según Franke *et al.* (1987), es importante, dependiendo de los objetivos del estudio, la definición de las condiciones de frontera. A grandes rasgos, los procesos de una investigación de este tipo tienen, de acuerdo con algunos autores (Reilly, 2001) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), hasta 22 pasos, algunos ya realizados, como definición del problema, revisión bibliográfica, búsqueda de información, análisis previo y el desarrollo del modelo conceptual sigue siendo el más fundamental.

El aspecto más importante del desarrollo del modelo conceptual es establecer la idea o concepto del funcionamiento del acuífero y la selección de las condiciones de frontera. En principio, a grandes rasgos, el acuífero Valle de Toluca está limitado por las elevaciones topográficas que lo definen al O, los volcanes Nevado de Toluca y San Antonio y al E las sierras de Las cruces y Monte Alto. Las erupciones que ocurrieron al Sur de la cuenca la cerraron y provocaron que el drenaje que corría hacia el S (océano Pacífico) labrara un cauce hacia el N-NO y formara el actual río Lerma. Varias erupciones de los tres centros volcánicos provocaron coladas de lava, lluvias de cenizas y nubes ardientes que junto a la erosión, bloques y cantos de origen volcánico, de los mismos centros, crearon la matriz del acuífero y se aprecia, de acuerdo con la información de los pozos, que éste se hace más profundo conforme se avanza hacia el N.

En algunos de los estudios previos realizados en Valle de Toluca se ha planteado la existencia en éste de dos acuíferos sobrepuestos, uno libre y otro confinado, subyacente al primero. Actualmente se sabe que no existe un confinamiento total (Sultan, 2001) en el acuífero y puede considerárselo un único cuerpo semiconfinado.

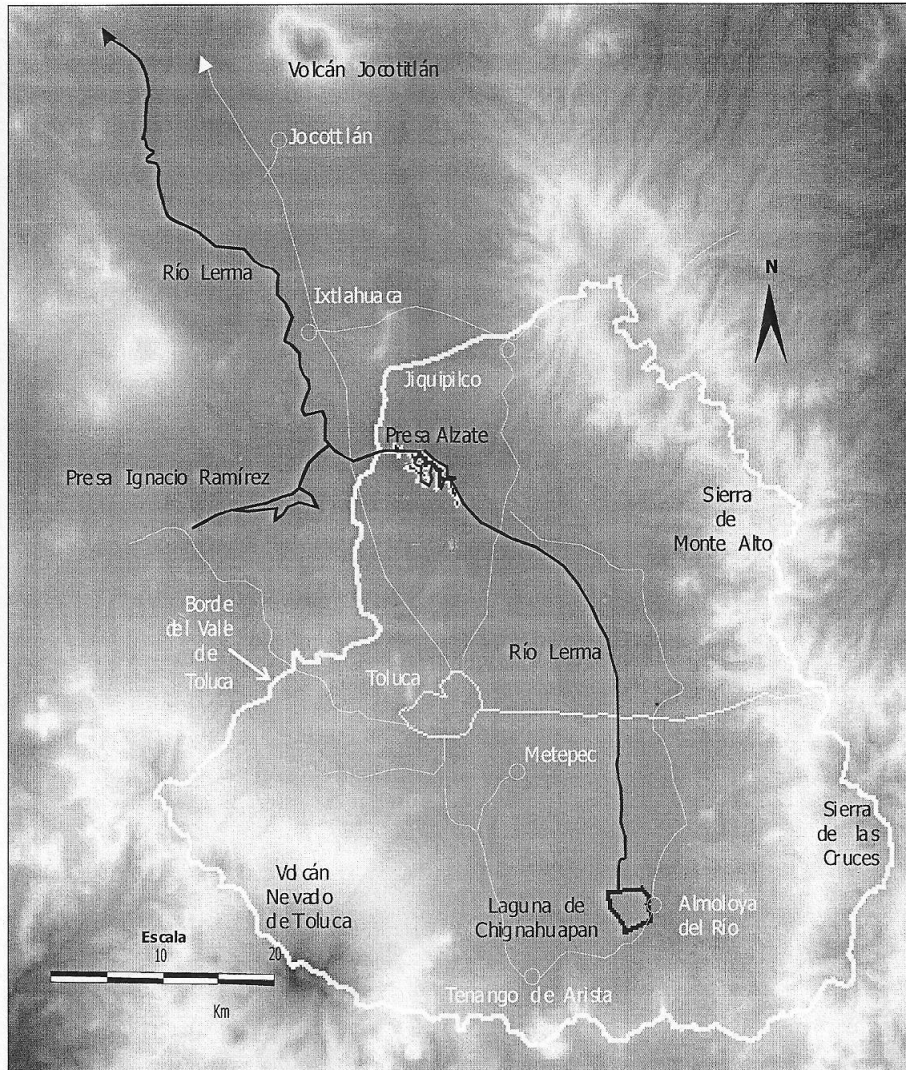


Figura 2.3. Orografía y principales poblaciones de la Cuenca Alta del río Lerma. Las alturas se marcan con los colores más claros. En el centro está la ciudad de Toluca, de donde parten las principales carreteras. Se aprecian las presas Ignacio Ramírez y José Antonio Alzate, así como la laguna de Chignahuapan, origen del río Lerma. Fuente: Modificado de Sultan (2001).

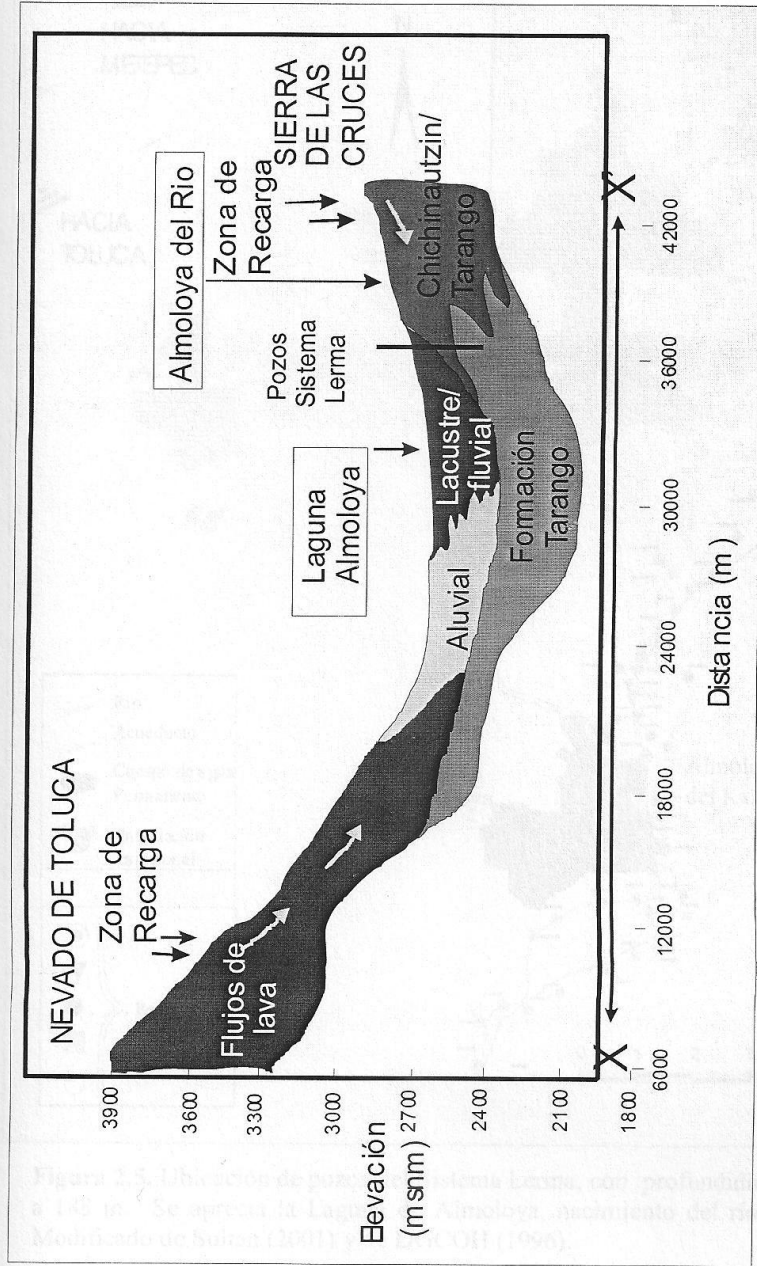


Figura 2.4. Perfil geológico de la cabecera de la cuenca, con dirección aproximada E-O; las zonas de recarga más notorias están en el O, las faldas del Nevado de Toluca al igual que, en el E, la Sierra de Las Cruces. Fuente: Modificado de Sultan (2001).

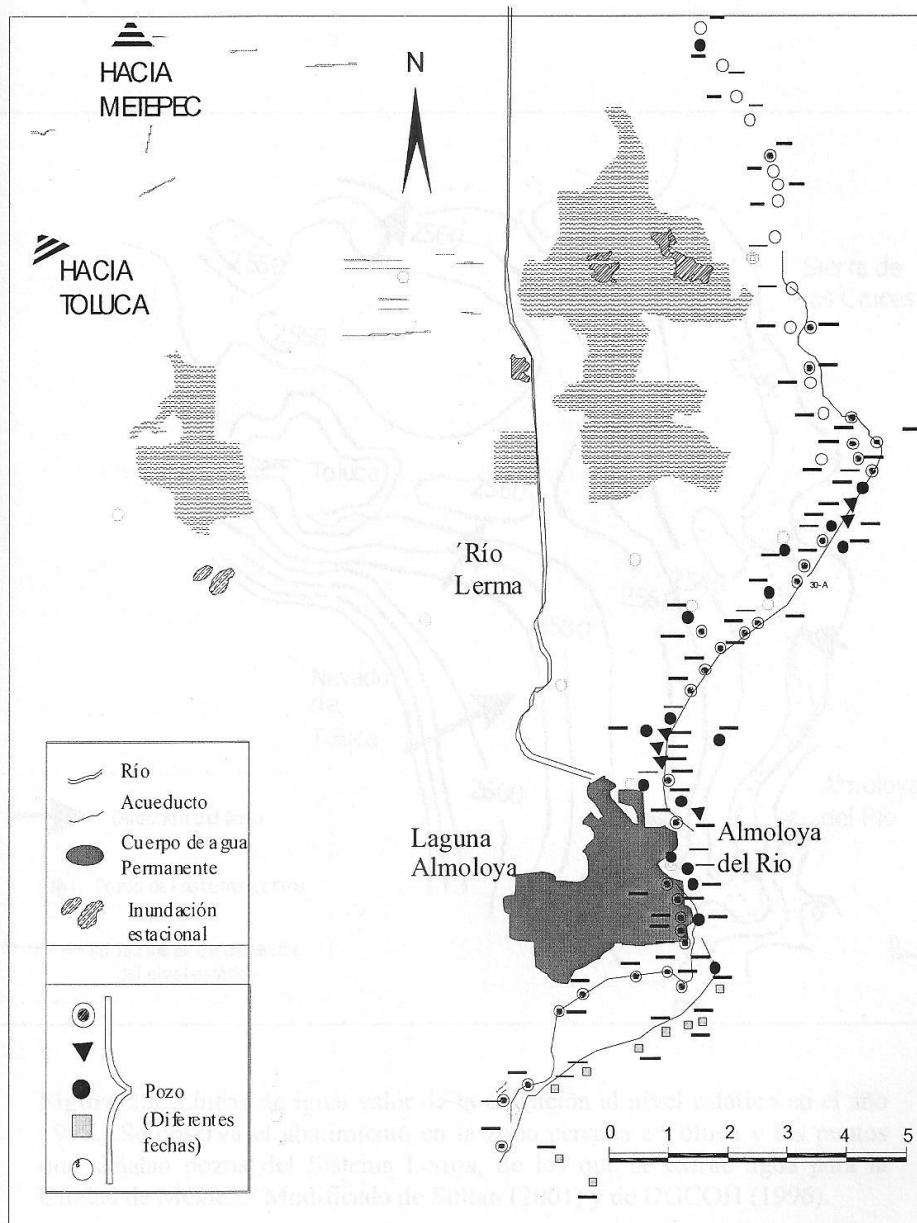


Figura 2.5. Ubicación de pozos del Sistema Lerma, con profundidades de 0 a 188 m. Se aprecia la Laguna de Almoloya, nacimiento del río Lerma. Modificado de Sultan (2001) y de DGCOH (1996).

2.5. Delimitación de la cuenca y del acuífero

La cuenca superficial del río Lerma se delimita en acuerdo con el partaguas y se apoya al límite establecido en otros estudios del Centro Interamericano del Agua (CIA) y del Estado de México.

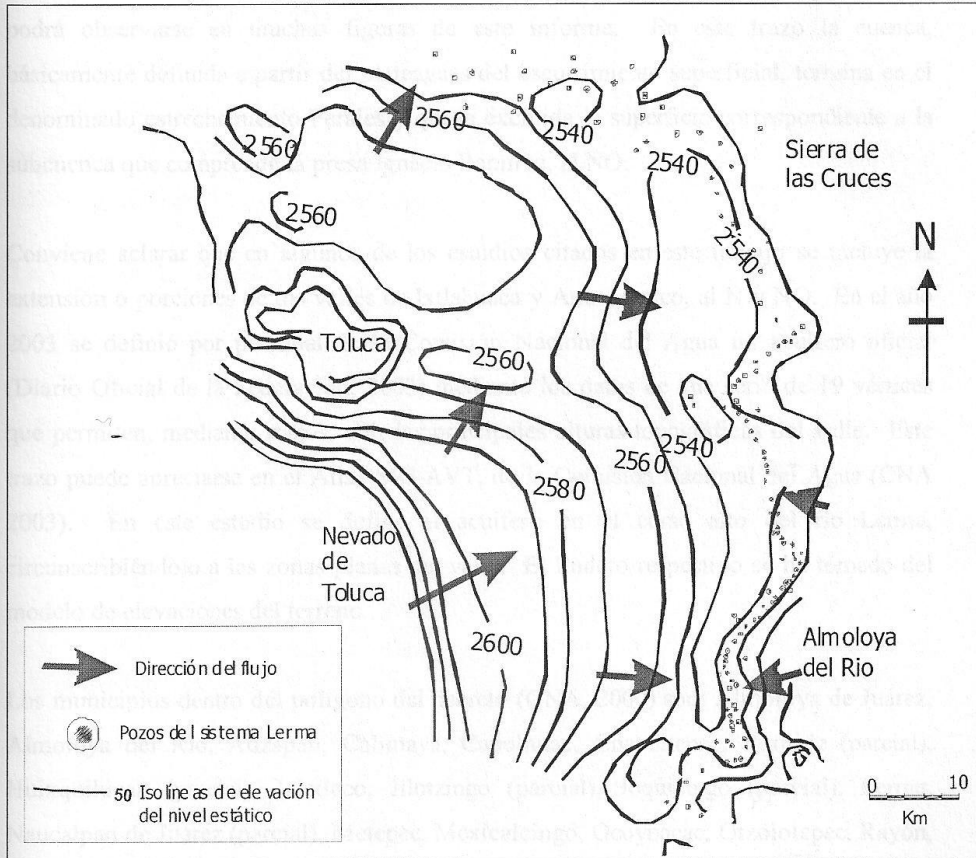


Figura 2.6. Líneas de igual valor de la elevación al nivel estático en el año 1992. Se observa el abatimiento en la zona cercana a Toluca y los puntos que señalan pozos del Sistema Lerma, de los que se extrae agua para la Ciudad de México. Modificado de Sultan (2001) y de DGCOH (1996).

2.5. Delimitación de la cuenca y del acuífero

La cuenca superficial fue definida de acuerdo con el parteaguas y se ajusta al límite establecido en otros estudios del Centro Interamericano del Agua (CIRA). Este trazo podrá observarse en muchas figuras de este informe. En este trazo la cuenca, básicamente definida a partir del parteaguas del escurrimiento superficial, termina en el denominado estrechamiento Perales y queda excluida la superficie correspondiente a la subcuenca que comprende la presa Ignacio Ramírez, al NO.

Conviene aclarar que en algunos de los estudios citados en este trabajo se incluye la extensión o porciones de los valles de Ixtlahuaca y Atlacomulco, al N y NO. En el año 2003 se definió por personal de la Comisión Nacional del Agua un acuífero oficial (Diario Oficial de la Federación, 2003) mediante los datos de una serie de 19 vértices que permiten, mediante trazos, unir las principales alturas topográficas del valle. Este trazo puede apreciarse en el Atlas SIG-AVT, de la Comisión Nacional del Agua (CNA 2003). En este estudio se define el acuífero en el curso alto del río Lerma, circunscribiéndolo a las zonas planas del valle. El lindero respectivo se ha tomado del modelo de elevaciones del terreno.

Los municipios dentro del polígono del decreto (CNA, 2000) son: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Iturbide (parcial), Huixquilucan (parcial), Jalatlaco, Jilotzingo (parcial), Joquicingo (parcial), Lerma, Naucalpan de Juárez (parcial), Metepec, Mexicalcingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle (parcial), Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xonacatlán (parcial) y Zinacantepec. De acuerdo con una cartografía de la misma CNA (2003), los municipios son: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Ixtlahuaca, Xalatlaco, Jiquipilco, Joquicingo, Lerma, Metepec, Mexicalcingo, Ocoyoacac,

Ocuilán, Oztolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec.

2.6. Información geológica

A continuación se expone la información geológica en el siguiente orden: en primer lugar la geología superficial, que es evidente sobre el terreno, a continuación la geología estructural, los lineamientos y fallas y por último la geología del subsuelo, obtenida de información de pozos y estudios regionales.

2.6.1. Geología superficial

El información de geología superficial del Valle que se muestra procede del sistema digital (SIG-AVT) elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) conjuntamente con la Gerencia del Estado de México de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2003). Con el fin de completar la información también se revisaron las cartas geológicas del INEGI que cubren la zona en escalas 1: 50,000 y 1:250,000.

Se dispuso también de la información de la Carta de la Dirección de Fomento Minero de la Secretaría de Desarrollo Económico del Gobierno del Estado de México, realizada por personal del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la cual se aprovechó el perfil geológico (Elías-Herrera *et al.*, 1994) presentado más adelante. En la Figura 2.7 se presenta la información geológica de la cuenca originada de todas las cartas antes mencionadas.



Figura 2.7 Mapa de geología del Estado de México Modificado de CNA (2003) y Elías-Herrera et al. (1994)

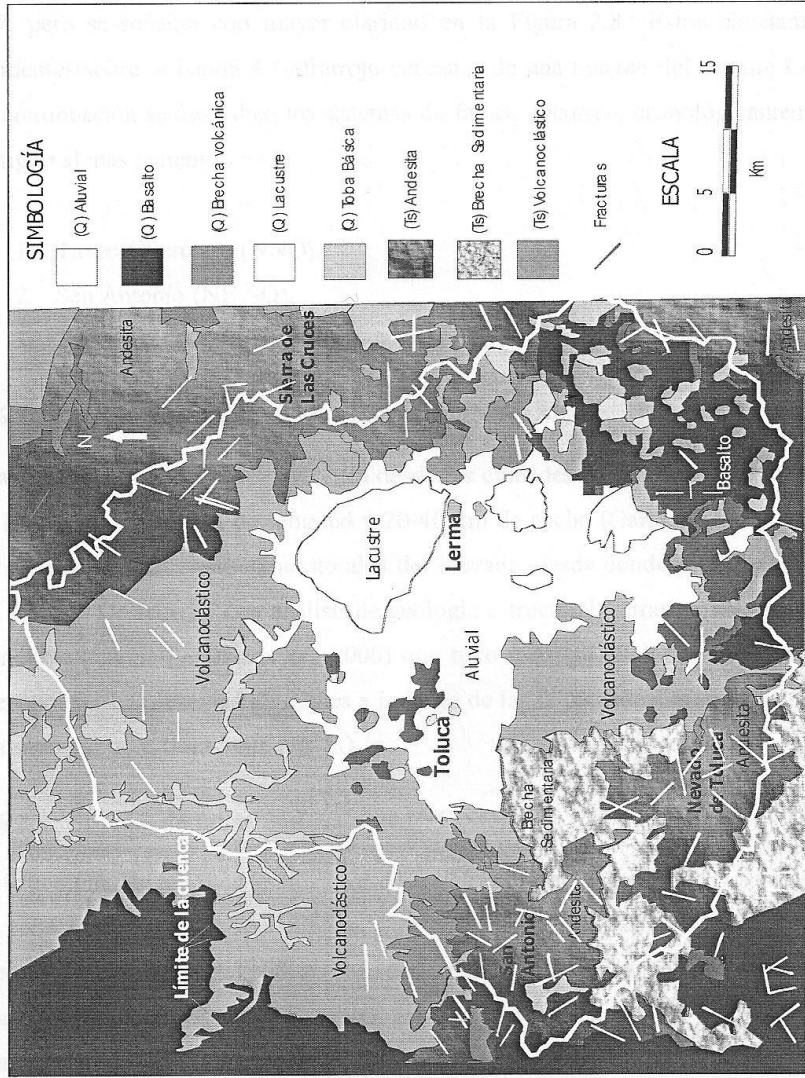


Figura 2.7. Mapa de geología superficial obtenido a partir de la información disponible del Valle de Toluca. Modificado de CNA (2003) y Elías-Herrera *et al.* (1994).

2.6.2. Geología estructural

El Nevado de Toluca se ubica en la frontera de las dos primeras zonas y en la intersección de tres sistemas de fallas regionales, de diferente orientación, edad y cinemática (García-Palomo *et al.*, 2000). Estos sistemas de fallas aparecen en la Figura 2.7, pero se señalan con mayor claridad en la Figura 2.8. Estos alineamientos son evidentes sobre la banda 4 (infrarrojo cercano) de una imagen del satélite LANDSAT. A continuación se describen los sistemas de fallas. Ocurren, cronológicamente del más antiguo al más reciente:

1. Taxco-Querétaro (NNO).
2. San Antonio (NE-SO).
3. Tenango (E-O).

2.6.2.1. Sistema de fallas Taxco-Querétaro (NNO SSE)

Este sistema corta al Valle de Toluca desde las ciudades de Taxco al S, hasta Querétaro, al NO; alcanza 250 km de longitud y 20-40 km de ancho (García-Palomo *et al.*, 2000). El sistema de fallas está expuesto al S del Nevado, desde donde puede ser identificado en 87 km. De acuerdo con análisis de geología estructural, estratigrafía y cinemática, se concluye (García-Palomo *et al.*, 2000) que tuvo tres episodios de actividad durante el Cenozoico. La presencia de diques a lo largo de las fallas indica un movimiento normal causado por un estiramiento NE-SO.

2.6.2.2. Sistema de fallas San Antonio (NE-SO)

Este conjunto de fallas se localiza entre los volcanes San Antonio y Nevado y es parte de la zona de ruptura de Tenochtitlán, que corre desde la zona de Zihuatanejo-Petatlán hasta la porción norte del Valle de México. Fallas de este sistema son, en la zona, las de San Antonio, San Miguel y Zacango, así como el graben de San Miguel. El sistema tiene 60 km de largo y 17 km de ancho en promedio.

2.6.2.3. Sistema de fallas Tenango (E-O)

Este sistema de fallas parte del Nevado de Toluca hacia el E, de acuerdo con los centros volcánicos que cerraron el valle y pertenece al sistema regional denominado Chapala-Tula (Johnson y Harrison, 1990). Bloomfield (1974), estableció la relación entre estas fallas y las andesitas Tenango, atribuyéndole a este movimiento una edad desde el inicio del Pleistoceno. El análisis de los datos anteriores sugiere que el sistema ha tenido dos episodios de movimiento; el más antiguo fue el acomodamiento por fallas normales, que fue seguido por una fase extensional que reactivó fracturas antiguas en fallas normales. El sistema creó el alineamiento de conos cineríticos que tienen entre 38,000 y 8,500 años de antigüedad.

2.6.3. Geología de subsuelo

Hay que señalar que la zona de estudio se circunscribe al Eje Neovolcánico, una franja volcánica transversal de una anchura aproximada de 200 km, de E a O y con una longitud de 1,200 km, desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México, que empieza en la ubicación de los centros volcánicos junto al Pacífico, Ceboruco, Colima y La Primavera, hasta el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba hacia el Golfo de México.

Esta franja transversal se considera que es una estructura volcánica originada por la subducción de la placa del Pacífico debajo de la placa norteamericana, explicándose la morfología actual de la zona por los efectos de la deriva continental y la coincidencia de otros bloques continentales (“cratones”). De esta manera se explica la geología actual del centro de México.

De acuerdo con la composición química de la lava originada (García-Palomo *et al.*, 2000) se diferencian tres provincias o zonas:

1. La Occidental, formada por el conjunto Colima-Chapala-Tepic con productos volcánicos alcalinos y calco-alcalinos.
2. La Central, con unos pocos estratovolcanes de composición andesita-dacita y algunas calderas de composición silícea con lavas calco-alcalinas.

3. La Oriental, caracterizada por estrato-volcanes de composición andesítica-dacítica con productos calco-alcalinos.

La explicación de los tipos de productos lávicos en el Eje Volcánico la dan estudios petrológicos, isotópicos con Osmio (Chesley *et al.*, 2000) y el autor Verma (2000). Concluyen que los volcanes calco-alcalinos son parcialmente originados por la fusión de la parte baja de la costra continental, mientras que los productos alcalinos (situados en la zona occidental) son originados por lavas máficas procedentes del manto.

En cuanto a la respuesta a la interrogante del espesor de los sedimentos en la cuenca, se tiene el hecho de que los pozos más profundos perforados en el Valle de Toluca alcanzan una profundidad aproximada de 600 m. Existe un perfil cuyo trazo se muestra en la Figura 2.9, de la distribución de formaciones en el subsuelo de la cuenca (Elías-Herrera *et al.*, 1994), que se muestra en la Figura 2.10. Este corte geológico señala una secuencia sedimentario-metamórfica (más probablemente metamorfizada y compactada en profundidad) de alrededor de 4,000 m. Esta información se ha obtenido a partir de la secuencia histórica de las formaciones de la cuenca, de los afloramientos de rocas en la vecindad de la misma, también de los cortes observados en el talud de la meseta, al S, en la cuenca del río Balsas y finalmente, de los datos de los pozos perforados en la cuenca, pero sobre todo en los más profundos, que se encuentran en la cuenca vecina del Valle de México, cuya historia según todos los autores mencionados, se supone similar a la del Valle de Toluca. En la actualidad no puede darse con precisión una cifra del espesor del acuífero, pero esto no significa que abarque toda la secuencia antes mencionada. Hay que considerar la posibilidad de que la calidad de las aguas se degrade con la profundidad aunque exista permeabilidad, tal como ocurre en los acuíferos en otras cuencas.

Los sistemas de fallas mencionados, E-O, NE-SO y NO-SE, manifiestan una gran actividad tectónica que se presenta en la superficie principalmente por esfuerzos de expansión. A este fenómeno se une el volcanismo que ha estado presente desde el Mioceno hasta el Cuaternario, manifestándose con corrientes de lava riolíticas, dacíticas,

andesíticas y basálticas; estas dos últimas son las más recientes y como tal se evidencian en la superficie (Figura 2.10).

2.6.4. Geología histórica

La geología de la zona se ha visto enriquecida en los últimos años por los trabajos de investigadores del Grupo de Ciencias de la Tierra de la UNAM que, dentro del terreno de la vulcanología, han avanzado en el conocimiento de la parte central de México. A esto se añade la labor de la dependencia de la Secretaría de Desarrollo Económico del Gobierno del Estado de México, que ha realizado una carta geológica detallada. Ambos trabajos se citan en este capítulo.

De acuerdo con García-Palomo *et al.* (2002), se distinguen 17 unidades estratigráficas en la zona del Valle de Toluca, que se citan desde la de mayor antigüedad hasta la más reciente:

1. **Conjunto Guerrero (Terrane).** Esta unidad del Mesozoico, está caracterizada por una secuencia sedimentario-volcánica del Jurásico Superior y el Cretácico Inferior. Está formada por varias capas que afloran al SE del Nevado de Toluca, en la cuenca del río Balsas y en el borde S de la cuenca del Valle de Toluca.
2. **Plataforma Guerrero-Morelos.** Del Mesozoico, consiste de calizas masivas con intercalaciones de dolomita. Aflora en los alrededores de Zumpahuacán, localizada entre Ixtapan de la Sal y Malinalco.
3. **Rocas ígneas intrusivas félsicas.** Esta unidad, de la era Cenozoica, período Eoceno, incluye dacitas ricas en cuarzo porfirídico fechadas por DeCserna *et al.* (1974) en 55 ± 6 millones de años (MA). Este cuerpo intrusivo se ubica al SO cerca de las poblaciones de Almoloya de Alquisiras y Malinaltenango.
4. **Formación Balsas.** De entre los períodos Eoceno y Oligoceno, consiste en conglomerados calcáreos, flujos de lava, areniscas, depósitos lacustres; yace bajo a la Formación Morelos con una disconformidad angular.

5. **Formación Tilzapotla.** Del Oligoceno. Es una secuencia de lavas riolíticas, riodacíticas y dacíticas junto con depósitos de piroclásticos. Fechadas por Fries (1960) en 31 ± 0.9 MA.
6. **Andesita basáltica San Nicolás.** Del Mioceno. Está compuesta de una lava vesicular que en algunos lugares tiene un espesor de 100 m. Su afloramiento ocurre al SE del Nevado de Toluca.
7. **Formación Tepoztlán.** Unidad del Mioceno medio (21.6 ± 1.0 MA), aflora en la proximidad de las poblaciones de Tepoztlán, Cocoyoc y Oaxtepec, su espesor varía entre 200 y 700 m. Consiste en lahares masivos ricos en clastos porfíricos de andesita intercalados con depósitos fluviales.
8. **Secuencia basal.** Del Mioceno, consiste en flujos de lava intercalados con brechas de composición andesítica. Alcanzan un espesor de 400 m, visibles en el E y O del Nevado de Toluca. García-Palomo (1998) en 7.5 ± 0.4 MA.
9. **Secuencia volcánica de San Antonio.** Son secuencias de gran espesor de flujos de lava, cubiertas por material piroclástico consistente de capas ricas en piroclastos de pumicitas del Mioceno medio (3.0 ± 0.2 MA).
10. **Secuencia de la Sierra de las Cruces.** Se localiza en la porción oriental del Valle de Toluca y lo separa del Valle de México. Está formada por varios estratovolcanes de composición andesítica: San Miguel, La Corona, Picacho, Zempoala y Ajusco. La secuencia está cubierta por las rocas más jóvenes del volcán Chichinautzin. Su edad varía entre 13 y 6 MA.
11. **Complejo de Conos y Domos.** Pertenecientes al Plioceno-Pleistoceno, compuestos de rocas que van de basalto-andesita a dacita en una alineación aproximada del NE al SO, entre los volcanes Nevado y San Antonio.
12. **Volcán Nevado de Toluca.** Del Pleistoceno al Holoceno. Se identificaron (Bloomfield, 1974; Bloomfield y Valastro, 1977) varios eventos: una erupción ocurrida hace unos 28,000 años que produjo lahares extendidos de color azul gris, luego otra hace 24,000 años que produjo la capa Pumicita Inferior Toluca y otra más hace 11,600 años que generó la Pumicita Toluca Superior. Cantagrel y Robin (1979) dividen en dos unidades las rocas que forman el Nevado de Toluca, la más antigua, una serie de flujos de lava andesítica porfírica, gris

claro, que constituyen el edificio del volcán y unas unidades más jóvenes de similar composición, clásticas y piroclásticas, que son fáciles de identificar por su color que va del color rosado al rojo, por su alteración meteórica. Estas unidades cubren los flancos actuales del volcán, formando abanicos aluviales hacia el N de la cuenca del Valle de Toluca. Estudios recientes, como el que se cita (García-Palomo *et al.*, 2002), resumen la secuencia de productos del Nevado de Toluca:

- a. **Avalancha antigua (DAD-1) y depósitos cohesivos, Pilcaya (PDF) y Mogote (MDF).** Constituyen avalanchas de material ígneo con materiales de las secuencias y complejos descritos antes, que se extienden hacia el S del volcán. Estos depósitos provienen de un colapso (rotura) del volcán. La PDF consiste en un depósito masivo con matriz cohesionante arenosa (arena 80% y arcilla 6%) que contiene megaclastos hasta de 15 m de diámetro, procedentes de todas las calizas y lavas precedentes. El MDF tiene la misma composición. A partir de las características de estos depósitos, García-Palomo *et al.* (2002) infieren que ocurrió un colapso debido a la alteración hidrotermal y a la disección del edificio antiguo del volcán, probablemente por acción de la falla Tenango (E-O), que provocó la avalancha hacia el S. Las lluvias causaron de nuevo el movimiento de la parte superior de la PDF, depositando el MDF.
- b. **Flujo de pumicita rosada.** (42,000 años) grueso depósito procedente de un flujo piroclástico, que consiste en, por lo menos, cuatro unidades compuestas de fragmentos semirredondeados de pumicita vesicular colocados en una matriz arenosa donde se han encontrado troncos de árboles.
- c. **Depósitos de flujos de bloques y ceniza.** (37,000, 32,000, 28,000, 26 y 14,000 años). García-Palomo *et al.* (2002) estiman que la actividad volcánica del Nevado de Toluca durante el Pleistoceno se caracterizó por erupciones cataclísmicas, relacionadas con la destrucción total o parcial

de los domos centrales (dacíticos). La última erupción es la única que tiene una distribución uniforme alrededor del volcán. Los flujos de esta erupción modificaron las faldas del volcán y en la actualidad existen en ellos minas de donde se extrae material para la construcción.

13. Pumicita Ocre. Cayó aproximadamente, hacia el N, a 5 km de la cumbre. Se sitúa esta erupción hace 39,000 años aproximadamente.

14. Pumicita Inferior Toluca (PIT). Se sitúa su ocurrencia en $24,260 \pm 670$ años. Es un abanico de lluvia de piroclastos que se dispersaron hacia el NE del cráter.

15. Flujo de pumicita blanca. Consiste en tres lluvias de cenizas y por lo menos dos unidades originadas por flujo de piroclastos. Se estima que ocurrió hace alrededor de $12,040 \pm 92$ años. Esta unidad se correlaciona con las cenizas Almoloya Inferior, encontradas al N de la laguna de Chignahuapan.

16. Pumicita Superior Toluca (PST). Corresponde a la erupción explosiva (Pliniana) más poderosa del Nevado. Comprendió cuatro flujos de piroclásticos y dos emisiones (surges) que cubrieron los valles de Toluca y de México. Se estima que esta erupción ocurrió hace 10,500 años.

17. Campo volcánico Chichinautzin. Es la manifestación volcánica más joven; consiste de series de conos de escoria de andesitas basálticas (volcán Tres Cruces, Holotepec) y flujos de lavas procedentes de fisuras (Tenango). Estos edificios, que constituyen la parte occidental del Campo Volcánico Chichinautzin, están localizadas en la porción E del Valle de Toluca. La edad de estos centros varía entre 38,000 a 1,500 años. El depósito superior de pumicitas del Nevado ($\sim 10,500$ años) marca el límite entre el Pleistoceno y el Holoceno.

Basándose en la correlación estratigráfica es obvio que las fallas E-O y que los conos distribuidos erráticamente en el Valle de Toluca son de la pumicita PST y tienen una edad entre 38,000 y 10,000 años.

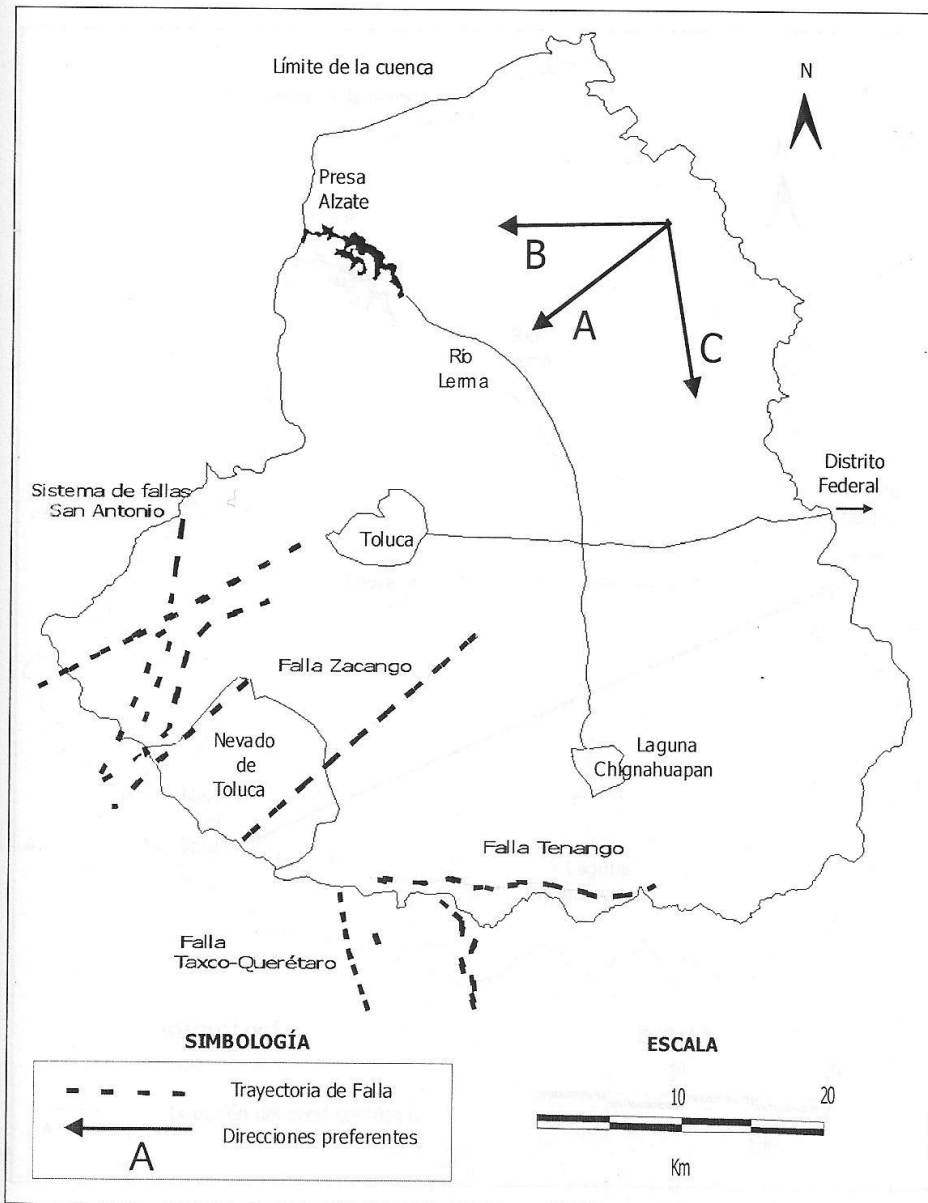


Figura 2.8. Trazos de las fallas que se distinguen en la banda 4 de la imagen del satélite LANDSAT. Se evidencian tres sistemas, (A) NE-SO, el de mayor influencia en el interior de la cuenca. (B) E-O, que separa la cuenca de la del río Balsas y (C) NO-SE, de característica regional (Sistema Chapala-Tula). Fuente: Modificado de García-Palomo *et al.* (2000).

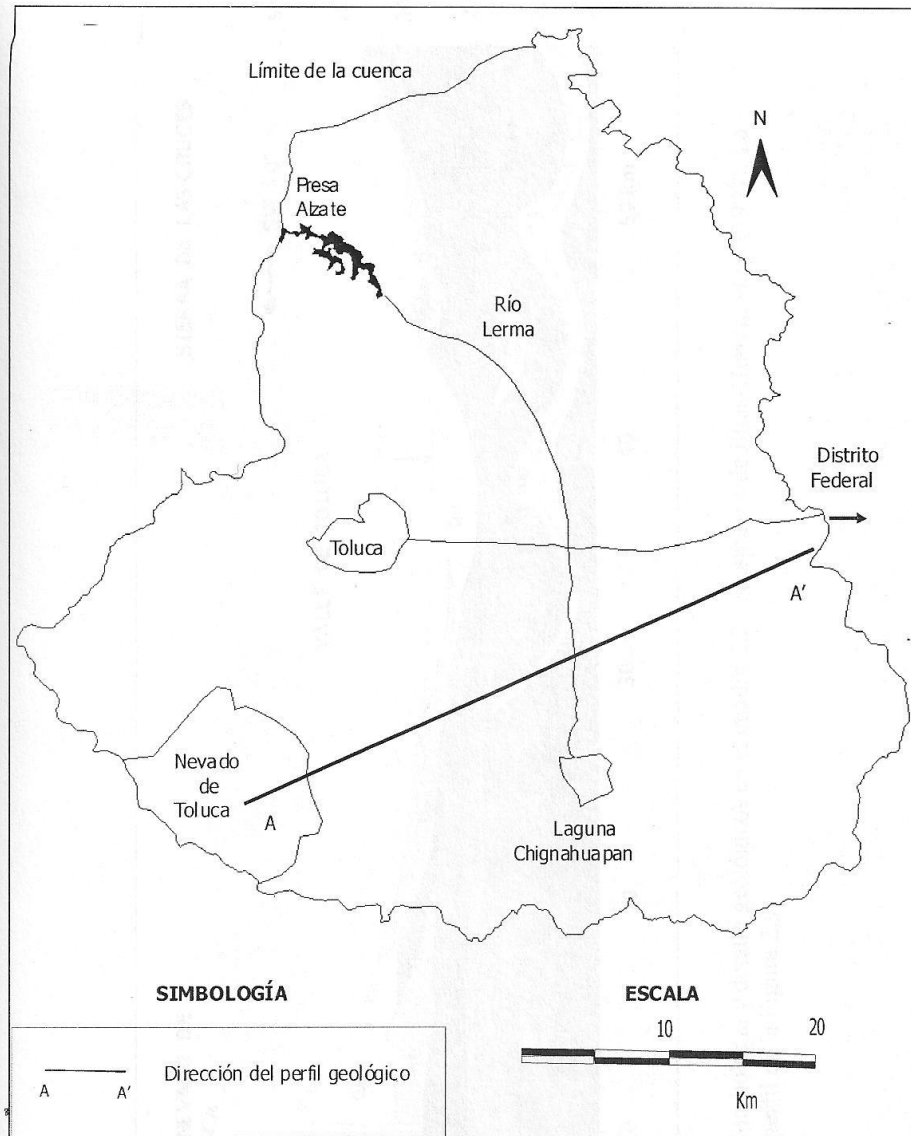


Figura 2.9. Dirección, 70° SO, del perfil geológico que en la Figura 2.10 muestra la probable estratigrafía de la cuenca. Modificado de Elías-Herrera *et al.* (1994).

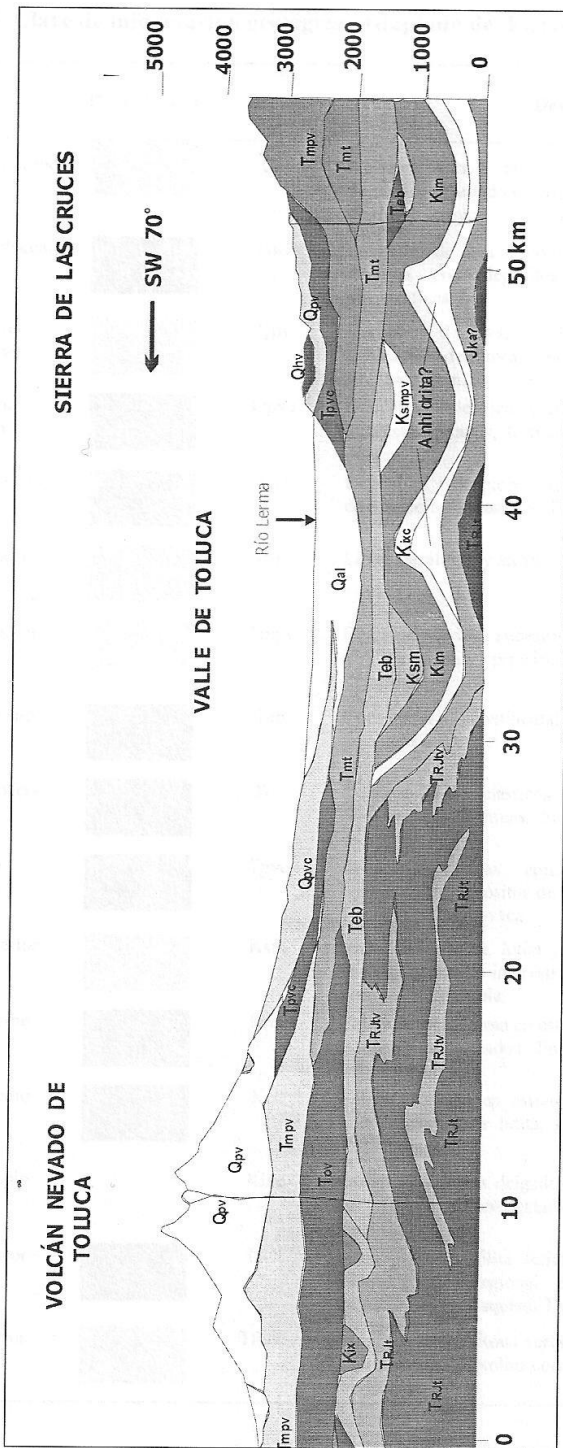


Figura 2.10. Simbología y detalle geológicos en el cuadro 2.2. Adaptados de Elías-Herrera *et al.* (1994). La dirección del perfil en la Figura 2.9.

Cuadro 1.2. Clave de información geológica. Adaptado de Elías-Herrera *et al.* (1994)

Era	C o l o r	Simbolo	Descripción
Cuaternario holoceno		Qal	Aluvión. Grava, arena con estratificación de ceniza volcánica resultado de erupciones y del drenaje a lo largo de ríos y arroyos.
Cuaternario holoceno		Qhv	Derrames de lava de composición andesítica, basáltica y dacítica con depósitos cineríticos y otras rocas piroclásticas.
Cuaternario pleistoceno		Qpv	Derrames de lava, basalto y andesita, aglomerado y brecha de derrames asociados. Incluye la formación Chichinautzin.
Cuaternario pleistoceno		Qpvc	Depósitos volcánicos clásticos, menor cantidad fluviales interestratificados; formación Zinacantepec, de lahar y pómez.
Terciario mioceno		Tmt	Depósitos volcánicos clásticos, principalmente lahar de composición andesítica. Formación Tepozotlán.
Terciario mioceno		Tmv	Lavas basálticas y andesíticas.
Terciario mioceno		Tmpv	Derrames de lava andesítico-basáltico. Tobas volcánicas indiferenciadas, principalmente andesíticas. Andesitas Zempoala.
Terciario eoceno		Teb	Conglomerado continental de areniscas y limonitas rojas. Formación Balsas.
Terciario oligoceno		Tov	Derrame de piroclásticos y de tobas de composición de riolíticas a riolíticas. Formación Xochitepec.
Terciario Plioceno		Tpvc	Rocas volcánicas epiclásticas, abanicos aluviales coalescentes, depósitos de lahar. Incluye las formaciones Tarango y Cuernavaca.
Cretácico superior		Ksm	Arenisca, limolita, lutita y conglomerados de grano fino de origen marino interestratificados con capas de caliza. Formación Mezcala.
Cretácico Medio		Kim	Caliza de plataforma en estratos de gruesos a masivos con estratos dolomitizados. Formación Morelos.
Cretácico Medio		Kix	Caliza arcillosa en estratos delgados a medianos, con intercalaciones de lutita, grauvaca y lava. Formación Xochipala.
Cretácico Medio		Kixc	Caliza en estratos delgados frecuentemente con nódulos de pedernal e intercalaciones de lutita. Formación Xochicalco.
Jurásico Inferior		TRJt	Filita grafitica, filita sericítica. La unidad posee un metamorfismo regional correspondiente a la facies esquisto verde. Esquisto Taxco.
Jurásico Inferior		TRJtv	Esquisto verde. Roca verde Taxco Viejo, metamorfismo regional cuyo protolito corresponde a lavas andesíticas y tobas.

2.6.5. Datos geológicos obtenidos de pozos

Los pozos en el Valle de Toluca (VT) básicamente tienen tres orígenes en cuanto a la dependencia que controla la construcción del aprovechamiento:

- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal (DGCOH-DF). Pozos perforados, tanto para extraer agua para la Ciudad de México, como para cumplir compromisos en el mismo Valle. Constituyen el Sistema Lerma.
- Gerencia de la Comisión Nacional del Agua en el Estado de México (CNA-GEDOMEX).
- Comisión de Aguas del Estado de México (CAEM).

El análisis de la información disponible permitió obtener 87 pozos con datos geológicos. De estos pozos, los que no disponían de coordenadas espaciales se localizaron sobre una imagen del Mapeador Temático (TM) del satélite LANDSAT de 30 m de resolución y corregida cartográficamente. La referencia cartográfica implica la expresión de la zona de la Tierra mediante un plano con coordenadas y un Datum. Por Datum se entiende el punto de contacto del elipsoide (superficie matemática) con el geoide (superficie de los valores de gravedad a nivel del mar en cada lugar de la Tierra) desde el que se toman las alturas. El geoide es definido como la equipotencial cero del campo gravitatorio de la Tierra.

Los planos del INEGI contienen, aparte de las coordenadas geográficas de latitud y longitud, coordenadas planas en la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), cuya unidad es el metro. Esta proyección es conforme (conserva la forma de las figuras) cilíndrica con paralelos y meridianos rectos. Divide a la Tierra (Franco-Maass y Valdez, 2003) en 60 zonas de 6° de longitud llamadas bandas meridianos. Las zonas para México van de la 11 a la 17 de E a O y de latitud forman franjas de 4° a partir del ecuador, a las que se les asignan letras, que en este caso van de la D a la letra J.

La mayor parte de la cartografía disponible en México se encontraba referenciada al Datum NAD27, basado en el vértice origen situado en Meades Ranch, Kansas, cuyos parámetros se asocian con el elipsoide de Clarke de 1866. Éste fue sustituido en 1998 por el INEGI, la autoridad geodésica en el país, por el ITRF92 en el GRS80, que permite el empleo de coordenadas tridimensionales (Franco-Maass y Valdez, 2003).

Los datos de altitud sobre el nivel del mar, o modelos de elevación del terreno disponibles, eran tres, es decir cubrimientos con datos (x,y,z) procedentes de diferentes dependencias de la UAEM. Para definir el mejor se aprovecharon los 60 datos tomados en una zona del volcán Nevado de Toluca con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de precisión (Franco-Maass, 2004) y se compararon sus diferencias con la información de los datos de los tres modelos de alturas sobre el terreno. La suma de los cuadrados de estas diferencias en cada punto permitió, al tomar el de valor mínimo, escoger uno de estos modelos de alturas del terreno.

A fin de tener una referencia plana y de alturas en metros se escogió para esta investigación la proyección cartográfica disponible en *IDRISI* utm-14n con Datum en WGS84. Otra opción de proyección cartográfica en *IDRISI* es la *mex27utm14*, que es la mencionada anteriormente, basada en el NAD27.

En el posicionamiento de los pozos se procedió, de manera iterativa, empleando simultáneamente varios apoyos tales como:

- La información del croquis de ubicación, que usualmente acompaña al registro eléctrico y estratigráfico de cada pozo.
- Un croquis de localización general facilitado por la DGOHDF, en una escala aproximada de 1:100,000.
- La carta topográfica en escala 1:50,000 de INEGI, que da información de infraestructura carretera, toponimia y además de la ubicación de poblaciones y parajes.

La operación anterior permitió ubicar todos los pozos mencionados en coordenadas x, y, z, mediante el Sistema de Información Geográfica *IDRISI* y la carta digital realizada empleando la imagen *LANDSAT* antes mencionada. Con la información de estos pozos se realizó una Base de Datos en el manejador *ACCESS* del sistema operativo *Microsoft*. Cada pozo se identifica por su número, su nombre, las tres coordenadas y se le asocia una simplificación de su columna estratigráfica extraída de la información de las empresas perforadoras.

Es probable que el proceso de localización descrito incluya algún error, pero se considera que no es significativo para el objeto de esta investigación y en cambio facilitó una ubicación que de otra manera hubiese requerido un estudio de campo para obtenerse.

El uso de la información de pozos presenta una dificultades para efectuar una correlación horizontal, debido a los diferentes criterios del personal de las empresas contratistas al describir las muestras de perforación. A fin de aprovechar los datos se realizó una simplificación, que consistió en considerar sólo los espesores representativos y además agrupar los tipos de rocas de acuerdo con los fines geohidrológicos en: basalto, arcilla, andesita, toba, arenas y gravas, agrupadas estas dos últimas, que representan las formaciones de máxima permeabilidad.

Otra dificultad, ya mencionada es que, excepto las capas de arcilla de espesor grande, que serían barreras al paso del agua, todas las capas pueden tener permeabilidad y de hecho la presentan por fracturamiento. Igualmente, dependiendo de la presencia de cementantes, las cenizas y las arenas pueden ser más o menos permeables. Este dato evidencia que la cuenca presenta en sus estratos una gran complejidad y heterogeneidad.

La geocentría puede ser de dos tipos: extensiva, para conocer las variaciones superficiales, y el método de estrato vertical (SEV), que permite conocer las variaciones de las formaciones rocosas en el vertical del punto de medición. En el método de estrato vertical se conocen los valores de permeabilidad k_p en la superficie del terreno mediante la lectura entre dos pines de k_p en el vertical.

2.7. Información geofísica

Existen variados métodos geofísicos destinados a la obtención de datos del subsuelo donde no se tienen evidencias directas como muestras procedentes de pozos perforados o afloramientos de rocas.

La información geofísica puede consistir en registros de pozos, tomados mediante un arreglo que se baja en un pozo perforado o en información superficial, captada sobre el terreno. Los registros de pozos son varios; los más comunes y efectivos son los registros eléctricos; estos datos, acompañados de la columna estratigráfica se encuentran en la información de los pozos perforados por la DGCOH-DF y CAEM. En cambio, no existe esta disponibilidad en la totalidad de los pozos CNA-GEDOMEX.

La lectura en pozos se realiza directamente en la formación mediante una sonda que se introduce en el pozo perforado desde la superficie, antes de la instalación de la tubería de ademe. La sonda posee dos pares de electrodos: un par emisor de corriente y otro receptor de voltaje, que capta el valor del potencial, mismo que se grafica automáticamente en un registro contra la profundidad, que es controlada desde la superficie del terreno. El registro eléctrico contiene de ordinario tres curvas: potencial natural, resistividad corta y resistividad larga o lateral.

La información geofísica superficial o captada sobre el terreno es diversa, variando desde un costo menor a uno mayor –lo que va acompañado paralelamente, de un menor a mayor poder de discriminación, que a su vez depende de los instrumentos empleados, la densidad de puntos en el levantamiento y las técnicas de interpretación y consiste en métodos magnetométricos, gravimétricos geoelectricos y sísmicos.

La geoelectricidad puede ser de dos tipos: levantamiento extensivo, para conocer las variaciones superficiales en el subsuelo o sondeo eléctrico vertical (SEV), que permite conocer las variaciones de las formaciones rocosas en la vertical del punto de medición. En el método geoelectrico superficial se captan valores de resistividad aparente (ρ_a) en la superficie del terreno mediante la lectura entre dos pares de electrodos del voltaje

provocado por una corriente eléctrica inyectada por otros dos electrodos clavados en el mismo. Usualmente los cuatro electrodos siguen un trazo lineal en una dirección. El valor de la lectura se asigna al punto central del arreglo, a una profundidad que es función del espaciamiento de los electrodos. En el levantamiento extensivo las lecturas son realizadas en cada punto del terreno con espaciamientos constantes del arreglo, suelen ser de relativamente poco alcance en profundidad, a diferencia del SEV, donde el centro de la medición es el punto de lectura y los sucesivos espaciamientos suministran datos ($V_i, I_i, i= 1 \dots 20$) que permiten, primero el cálculo de la resistividad aparente (ρ_a) y posteriormente el de la resistividad real (Orellana y Mooney, 1966) de las rocas del subsuelo en función de la profundidad, $\rho(z)$, en la que el SEV puede alcanzar un valor profundo si la longitud del cableado sobre el terreno es extensa.

En geoelectricidad existen varios arreglos dependiendo de las distancias relativas entre los electrodos de intensidad y de voltaje. En el arreglo tipo Schlumberger, de cuatro electrodos, los dos de corriente (A, B) se colocan en el exterior y los dos de potencial o lectura (M, N) en el interior. El alcance en profundidad es aproximadamente un tercio de la distancia entre los electrodos externos y debe cumplirse que $MN < AB/5$ (Hervás, 1965).

Los sondeos eléctricos verticales pertenecen a un tipo de levantamiento superficial, muy socorrido en las prospecciones de agua por la economía de levantamiento de datos en campo y la utilidad de los datos que proporcionan. El parámetro de resistividad depende del tipo de formación de la roca, de su contenido de agua (porosidad) y de los iones disueltos en el líquido.

Se ha dispuesto para este estudio de información geofísica de los dos tipos requeridos por la CNA, de acuerdo con su normatividad. De acuerdo con esta última, se requiere efectuar sondeos geoelectrónicos verticales (SEV) para la autorización de la localización de un pozo y registros eléctricos en el interior de los pozos recién perforados.

En la subgerencia de Administración de la Gerencia Estatal de la CNA se encontraron tres sondeos locales, sondeos arreglo tipo Schlumberger. Se ha dispuesto también de la información de los SEV levantados por la empresa HERRAM (1992). Consisten en sondeos eléctricos profundos, de tipo regional, que alcanzaron un despliegue de electrodos de corriente (AB) que alcanzó los 2 km en algunos puntos. Los datos de estos sondeos fueron posteriormente utilizados por la empresa ARIEL (1996) para la elaboración de tres perfiles en la cuenca, con información geohidrológica. Estos tres cortes, que se exponen a continuación son producto de una interpretación de la geología del subsuelo del Valle de Toluca con información apoyada con algunos datos de pozos y de geología superficial. El trazo de los perfiles se muestra en la Figura 2.11. En la Figura 2.12 las sección AA', en la Figura 2.13 se encuentra la BB' y el perfil DD' se muestra en la Figura 2.14.

La información de los sondeos se integró a la base de datos *ACCESS* mencionada en el subcapítulo anterior, cuya información fue integrada para definir en profundidad los diferentes estratos que conforman el acuífero. En la Figura 2.15 se presenta la localización de los pozos y sondeos eléctricos cuyos datos se utilizaron para definir la profundidad del borde superior de la segunda capa, formada por roca ígnea, en el modelo de subsuelo que se propone más adelante. Los datos de resistividades (ρ : ohm-m) en profundidad de los sondeos fueron estratificados en cinco clases:

- a.- de 1.0 a 35,
- b.- de 36 a 100,
- c.- de 101 a 200,
- d.- de 201 hasta 1000 y
- e.- de más de 1001 ohm-m.

La posible formación TARANGO (así identificada por algunos de los informes) que marca el estrato de roca ígnea, tiene una resistividad (ρ -m) que se encuentra en el intervalo 80-90 ohm-m.

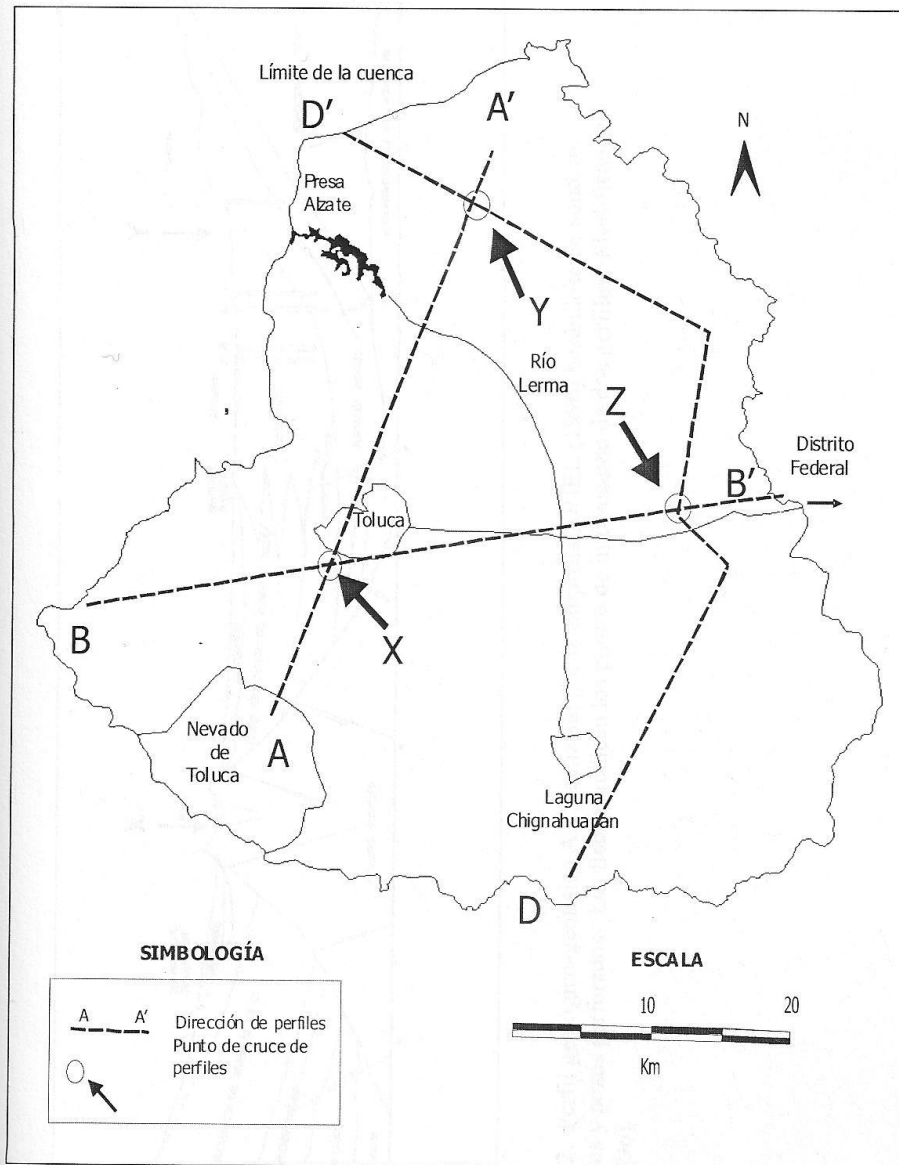


Figura 2.11. Ubicación de los perfiles de la empresa ARIEL (1996). El perfil AA' sigue la dirección del eje principal longitudinal; el perfil BB', la dirección transversal de la cuenca. La sección DD' es la de mayor cubrimiento en la cuenca. Los cruces de los perfiles son los puntos X, Y, Z. Modificado de ARIEL (1996).