



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE TOLUCA (1501), ESTADO
DE MÉXICO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	3
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	6
2. ESTUDIOS TECNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	7
3. FISIOGRAFIA	12
3.1 Provincia fisiográfica	12
3.2 Clima	13
3.3 HIDROGRAFÍA.....	14
3.4 Geomorfología	15
4. GEOLOGIA.....	16
4.1 Estratigrafía.....	16
4.2 Geología estructural	22
4.3 Geología del subsuelo	22
5. HIDROGEOLOGIA	25
5.1 Tipo de acuífero	25
5.2 Parámetros hidráulicos	28
5.3 Piezometría.....	34
5.4 Comportamiento hidráulico	34
5.4.1 Profundidad del nivel estatico.....	35
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	36
5.4.3 Evolución del nivel estático	37
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	38
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	40
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	43
8. DISPONIBILIDAD	47
8.1 Recarga total media anual (R).....	47
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	47
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	48
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	48
9. Bibliografía y Referencias	49

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (LAN) contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, y de la CONAGUA.

El método que establece la NOM indica que para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas deberá de realizarse un balance de las mismas, donde se defina de manera precisa la recarga de los acuíferos, y de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

El cálculo de la disponibilidad obtenida permitirá una mejor administración del recurso hídrico subterráneo ya que el otorgamiento de nuevas concesiones sólo podrá efectuarse en acuíferos con disponibilidad de agua subterránea. Los datos técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información necesaria, en donde quede claramente especificado el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar, considerando los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el REPDA. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para fines de administración del recurso, para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, para los planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, y en las estrategias para resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

El Valle de Toluca forma parte de la Cuenca Alta del Río Lerma junto con el Valle de Ixtlahuaca, tiene un buen potencial de aguas subterráneas el cual ha sido mermado

por la exportación de grandes volúmenes mediante la batería de pozos del sistema Lerma para la Ciudad de México, así como por explotaciones locales para su desarrollo, las extracciones han rebasado la potencialidad de los acuíferos, es decir, el monto de la recarga media anual, ante el aumento de una demanda siempre creciente, que se reflejan en un abatimiento de los niveles piezométricos y formación de grietas en el terreno, por esta razón es prioritario publicar la Disponibilidad de las Aguas Subterráneas del acuífero Valle de Toluca.

La importancia del manejo y administración de las aguas subterráneas es evidente, más aún en aquellas regiones donde es significativa su participación como fuente de abastecimiento; por otro lado, el establecimiento de políticas de manejo puede resultar una tarea compleja, ante esta situación se determinó la nueva regionalización hidrológica-administrativa y en la Gerencia Regional Lerma-Santiago-Pacífico, con sede en la ciudad de Guadalajara, quedó comprendido el acuífero Valle de Toluca en la cuenca alta del Río Lerma, mediante acuerdo publicado en el diario oficial de la federación el 18 de mayo de 1998.

1.1 Localización

El acuífero Valle de Toluca se localiza en el Estado de México, dentro de la cuenca Alta del Río Lerma, situada al sur del Altiplano Mexicano y limitada al Norte por el acuífero de Atlacomulco-Ixtlahuaca, al Sur por el cerro de Tenango, al Sur-Poniente del Volcán Nevado de Toluca y al Oriente por la Sierra de las Cruces y Monte Alto respectivamente, cubriendo un área total aproximada de 2,738 km² (Figura 1). Se puede decir sin duda que en general la zona está muy bien comunicada, por lo que se refiere a vías terrestres, la ciudad de Toluca comunica con la ciudad de México por la carretera No. 15; hacia el norte, con Atlacomulco y Querétaro por la autopista estatal No. 55, comunicando con Almoloya de Juárez y pasando por Ixtlahuaca; hacia el poniente con Zitácuaro, Valle de Bravo y Temascaltepec por las carreteras No. 15, 1 y 134, respectivamente, y hacia el Sur, con Tenango del Valle y Tenancingo por la continuación de la carretera No. 55. También hay buena comunicación a través del ferrocarril, que comunica a la ciudad de México y Acámbaro, Morelia y Guadalajara, cuenta además con el aeropuerto internacional Adolfo López Mateos, ubicado entre

Lerma y Toluca, a un lado del corredor industrial y a escasos 5 km de la capital del estado.

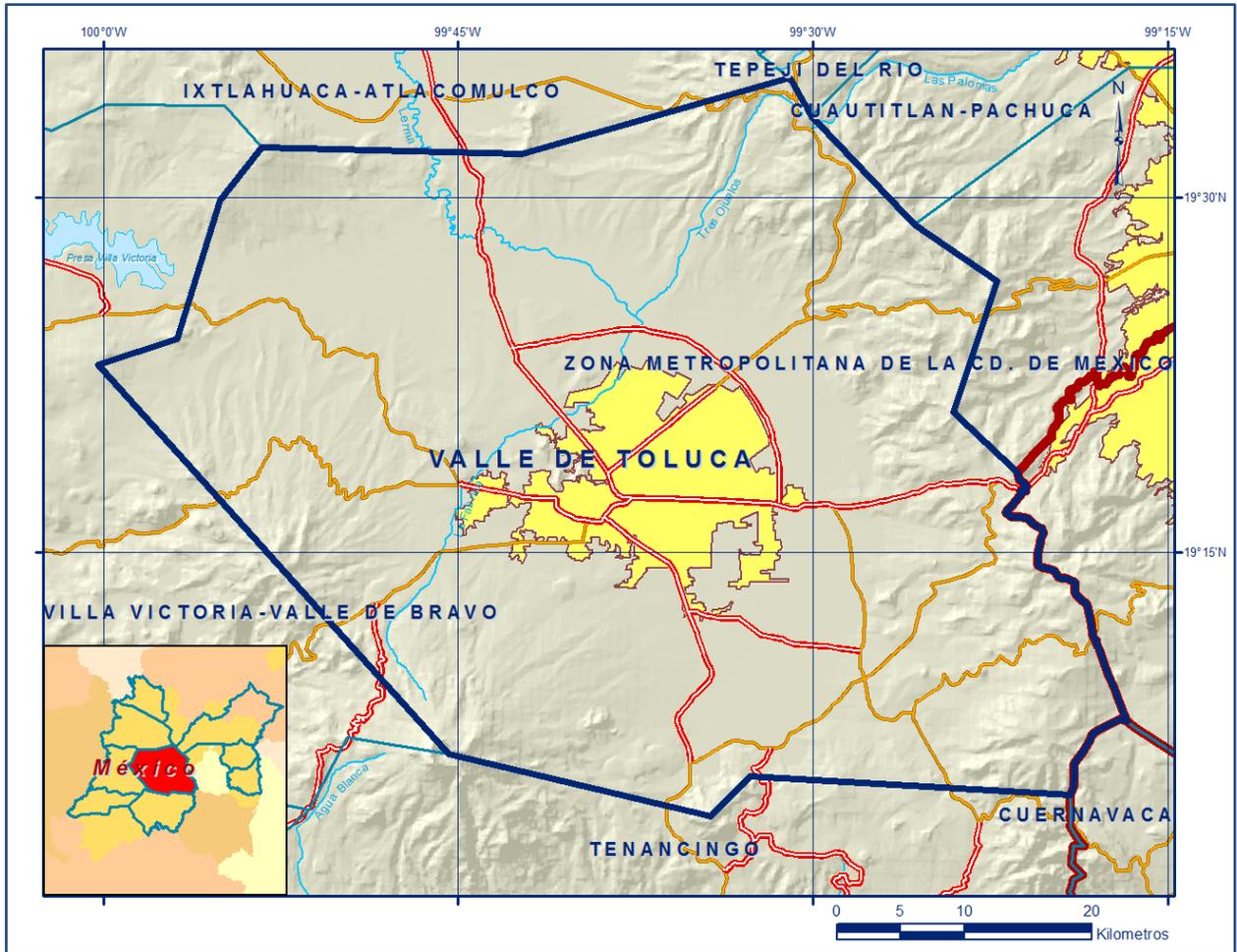


Figura 1. Localización del acuífero

Coordenadas

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

ACUIFERO 1501 VALLE DE TOLUCA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	21	22.1	19	18	22.7	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	16	44.9	19	7	50.0	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	99	19	8.5	19	4	44.6	
4	99	32	40.9	19	5	32.2	
5	99	34	19.3	19	3	50.4	
6	99	45	24.6	19	6	28.1	
7	100	0	11.5	19	22	55.2	
8	99	56	51.3	19	24	2.0	
9	99	55	3.7	19	29	52.2	
10	99	53	17.1	19	32	6.6	
11	99	42	17.7	19	31	49.0	
12	99	30	59.2	19	35	4.1	
13	99	30	6.3	19	33	27.0	
14	99	25	42.6	19	28	51.6	
15	99	22	14.9	19	26	27.3	
16	99	24	5.5	19	20	55.5	
1	99	21	22.1	19	18	22.7	

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

Municipios

Los municipios comprendidos dentro del polígono del acuífero Valle de Toluca 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, Oztolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle (parcial), Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xonacatlán (parcial) y Zinacantepec.

Población

De acuerdo a datos censales, la población del Estado de México de acuerdo al conteo 1995 del INEGI, ⁽¹³⁾, es de 11'707,964 habitantes, representando el 13% de la población del país, siendo la entidad con mayor densidad de población con 535 hab/km². El crecimiento de la población del estado no ha sido homogéneo, sino que se ha concentrado en áreas muy delimitadas y entre otros municipios destacan Toluca, Metepec, Lerma, y Zinacantepec respectivamente, creciendo de 819,915 habitantes en 1990 a 983,416 en 1995 (tabla I), esto es que la población creció casi un 17% en cinco años, debido al acelerado crecimiento por el desarrollo industrial y habitacional. Cabe

destacar que entre 1950 y los años ochenta, el Estado de México pasó a ocupar del **séptimo al primer lugar**, entre las 32 entidades federativas en cuanto a población total.

Gran parte del aumento de la población, tanto estatal como regional, ocurrió durante los decenios de los años 60 y 70 cuando se registraron tasas de crecimiento medio anual de 7 y 4 %, respectivamente. Durante los años ochenta, se presentó una desaceleración más pronunciada a nivel estatal, pues mientras que la población del estado creció 2.6 % en el periodo 1980-1990, la población de la región lo hizo a una tasa media anual de 3%.

El comportamiento de la población regional, en su conjunto, está fuertemente influenciado por el de la población de los municipios conurbados de Lerma, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec, en donde se localiza la capital del Estado de México, ya que en él radica poco más de 85% de la población de la región.

TABLA I
POBLACIÓN REGIONAL, VALLE DE TOLUCA 1990-1995

Estado y municipio	1990	1995
Estado	9'815,795	11,707,964
Región	819,915	983,416
Municipio		
Toluca	487,612	564,476
Metepec	140,268	178,096
Lerma	66,912	81,192
San Mateo Atenco	41,926	54,089
Zinacantepec	83,197	105,566

1.2 Situación administrativa del acuífero

Decretos de Veda

Mediante Decreto Presidencial de fecha 10 de agosto de 1965 se estableció Veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de Aguas del Subsuelo en la zona conocida como Valle de Toluca, del tipo rígida, su disponibilidad se considera escasa y su condición geohidrológica sobreexplotada, fue publicado en el diario oficial de la federación el 23 de septiembre del mismo año.

Zonas de disponibilidad

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

Organización de usuarios

Existen instaladas las organizaciones de usuarios con la representación por cada uso del agua como el Industrial, Servicios, Público-Urbano y Agrícola, dentro del Consejo de Cuenca en el estado de México.

Unidades de riego

Existen 136 unidades de riego organizadas, con una superficie total de 21,233 has. y 16,724 usuarios.

Usuarios mayores de agua subterránea

Los mayores usuarios por uso de agua subterránea son por orden de importancia: Público-Urbano, Industrial, Agrícola y Servicios.

2. ESTUDIOS TECNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Se tiene conocimiento de estudios hechos desde principios de siglo para bombear aguas de los manantiales del Río Lerma y conducir las por gravedad a la Ciudad de México. Posteriormente esta idea fue retomada varias veces considerando distintas posibilidades en cuanto al volumen captado y las obras de conducción; sin embargo, como se verá más adelante, hasta 1960 se hizo un estudio cuantitativo del Alto Lerma enfocado específicamente a determinar el volumen de aguas subterráneas factible de captar.

El primer estudio consultado fue realizado por la Cía. Servicios Geológicos, S.A. en 1966 para la DGCOH (!), con el objeto de incrementar, hasta donde fuera posible, las captaciones actuales en el Alto Lerma y construir nuevas obras para cubrir las

demandas de agua potable de la ciudad de México, comprende al Valle de Toluca y Lerma de Villada principalmente, cubre aspectos geológicos y aplica coeficientes empíricos de infiltración, modificando a la baja las cifras reportadas en estudios previos que utilizaron el mismo procedimiento. Uno de esos estudios fue realizado en 1960 por el Dr. A. Loehnberg ⁽²⁾, quien llegó a determinar un potencial del orden de 7.1 a 10.5 m³/s aproximadamente para el área que nos ocupa.

Los otros estudios fueron hechos por Veytia en 1960 ⁽³⁾ ⁽⁴⁾; en el primero determina el potencial de los acuíferos en la cuenca alta del Río Lerma hasta la estación Hacienda La "Y" entre 11.8 m³/s hasta 3.2 m³/s adicionales en caso de abatir el nivel freático en la zona de lagunas y pantanos para evitar evaporaciones. En el segundo estudio se afina la cifra anterior a 12.2 m³/s.

El siguiente estudio consultado se realizó en 1970 por la Oficina de Estudios Especiales de la SRH⁽⁵⁾, como una distribución al abastecimiento de agua para la ciudad de México, es uno de los más completos en la materia, pues se apoyó en observaciones hechas en una red de estaciones piezométricas, con piezómetros colocados a distintas profundidades para el estudio de acuíferos múltiples, además de las medidas piezométricas tradicionales en pozos de bombeo, presenta una serie de configuraciones piezométricas con las que se calibró un modelo matemático, representativo del comportamiento de los acuíferos. Es de hacer notar que la elevación del nivel piezométrico a 150 m de profundidad era del orden de 2,650 msnm en el área urbana de Toluca, y en el periodo 1966-1970, el abatimiento piezométrico fue del orden de 3 a 4 m en la misma zona urbana. Establece que la alimentación a los acuíferos de Toluca e Ixtlahuaca, en números redondos, es del orden de 11 m³/s en promedio y finaliza señalando los efectos directos inducidos por el sobrebombeo, tales como desaparición de manantiales, secado de numerosas norias por el descenso del nivel freático y un mayor costo del bombeo por los mismos abatimientos, y como efectos indirectos se señalan los hundimientos regionales del terreno y su agrietamiento.

Hay varios estudios relativos al comportamiento de grietas y su medición en el valle del Alto Lerma, que tienen interés por estar relacionados con la sobreexplotación de los acuíferos y sus efectos secundarios inducidos, mismos que serán comentados a continuación.

En 1977 la Cía. de Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados llevó a cabo una actualización del levantamiento de las grietas ⁽⁷⁾, para la Comisión de Aguas del Valle de México, con el objetivo de censar todas las grietas localizadas en los valles de Toluca e Ixtlahuaca, verificando localización, abertura, profundidad y orientación. Para la CAVM era motivo de grave inquietud la presencia de estas grietas, muchas de ellas de reciente formación, tanto por la sobreexplotación de los acuíferos como por la construcción de obras previstas para conducir las aguas del proyecto Cutzamala a la ciudad de México, también en este año, la misma empresa realizó una serie de investigaciones geofísicas resistivas. El objetivo consistió en investigar en una zona de grietas identificadas, la forma en que se reflejan en un campo eléctrico, tanto para su correlación donde se puedan observar claramente en el terreno como para inferirlas en sus estribaciones donde no se observan superficialmente.

En el estudio CONSULTEC realizado en 1978 ⁽⁶⁾, se concluye que las grietas se deben a la explotación de agua subterránea y se localizan en formaciones lacustres compresibles, cerca de las transiciones geológicas con formaciones más compactas, en el Valle de Toluca se censaron tres grietas activas, localizadas por las exlagunas de la porción suroccidental.

En el año de 1979 la citada empresa CONSULTEC realizó otro estudio para la Comisión de Aguas del Valle de México ⁽⁹⁾, con el objeto de estudiar las causas y efectos de los agrietamientos, así como la instrumentación de 15 estaciones de medición con observaciones durante un año, de los desplazamientos, tanto horizontales como verticales de vértices monumentados, fijos al terreno en la vecindad de las grietas, además de tomar en cuenta aspectos piezométricos en los pozos y en las estaciones piezométricas de la CAVM y de mecánica de suelos, reporta la existencia de aproximadamente 100 grietas en un área de unos 1,500 km² de las grietas que finalmente se seleccionaron para su instrumentación, tres corresponden al Valle de Toluca, en esta valle se censaron 21 grietas al sur de la carretera Toluca-Lerma, reportando aumentos en su longitud y profundidad, y aumentos o disminución de su abertura.

Asimismo, otro trabajo realizado por la Cía. ICATEC en 1985 “estudio geohidrológico preliminar del Valle de Toluca” realizó un censo de 626 pozos, determinando un volumen de recarga anual de 364 Mm³ y extracciones de 413 Mm³

En 1986 la Cía. ININ, S.A. hizo el Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de pozos para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. Con criterio geohidrológico se delimitaron zonas en las cuencas de México y del Alto Lerma, atendiendo las características, comportamiento, condiciones de explotación y calidad del agua de los acuíferos. Propone anteproyectos de pozos para cada una de las zonas definidas, y recomienda la metodología a seguir para la localización, construcción, operación y mantenimiento de los pozos.

En 1987 la Cía. Lesser y Asociados ⁽⁹⁾ realizó otro trabajo con el propósito de medir los niveles estáticos en los pozos piloto de los valles de Toluca e Ixtlahuaca, determinar la evolución de la superficie piezométrica del acuífero y obtener datos para apoyar los numerosos dictámenes que se requieren sobre solicitudes de perforaciones nuevas, rehabilitaciones de pozos y cancelaciones, reporta datos interesantes relacionados con la evolución piezométrica registrada, como la del período 1970-1987, que manifiesta abatimientos de 70 m en la zona industrial aledaña a la ciudad de Toluca, que disminuyen radialmente hasta mostrar abatimientos entre 10 y 20 m. en el resto del valle; en la porción sur, los mayores abatimientos son del orden de 30 m y se presentan hacia Almoloya del Río; a la altura de la población de Lerma, el abatimiento piezométrico es del orden de 40 m hacia el oriente y disminuye a 20 m hacia el poniente; en el área de Santa María Atarasquillo los abatimientos varían entre 30 y 60 m en el período señalado, en la parte del norte del Valle de Toluca se localizan los menores abatimientos, del orden de 10 m.

Resumiendo, ha habido un abatimiento piezométrico regional en el acuífero de todo el valle, siendo más notable en dos áreas: la zona industrial de la ciudad de Toluca y en una franja alargada al pie de la sierra de las Cruces, ambas zonas caracterizadas por la extracción de abundantes volúmenes de agua subterránea por medio de pozos.

El siguiente trabajo consultado se hizo en 1989 ⁽¹⁰⁾ por la Cía. Perforaciones Leor, con objetivos muy diversos y ambiciosos, entre los cuales destacan el estudio de la evolución de niveles y gastos de extracción en cada pozo, para emitir un dictamen sobre su comportamiento y vida útil; investigar posibilidades de un agotamiento de los horizontes acuíferos como causa del detrimento en los caudales de producción de los pozos y establecer una relación abatimiento-agrietamiento-afectación de pozos, para los Valles de Toluca e Ixtlahuaca.

Se concluye que el agua que ingresa a la ciudad de México proveniente del Alto Lerma ha registrado disminuciones a través del tiempo, en 1974 se estimaba en 14.6 m³/s, en 1985 de 6.24 m³/s y en 1989 de 4.319 m³/s. Asimismo, se hicieron 16 pruebas de bombeo en el Valle de Toluca y se asienta que las causas principales de la disminución del bombeo son: el número de pozos continuamente parados por extracción de arenas en Ixtlahuaca; pozos suspendidos para no afectar la estabilidad de las presa Álzate y Ramírez; pozos suspendidos por mala calidad del agua subterránea, y tibiamente señalado, un posible aumento del agua destinada al riego local en detrimento del volumen conducido a la ciudad de México.

Nuevamente en 1992 ⁽¹⁾ la Cía. Lesser y Asociados S.A. de C.V. realizó un estudio para implementar la reglamentación de las extracciones del agua subterránea en el acuífero de Toluca, siendo sus objetivos principales determinar las condiciones del acuífero, implementar un modelo matemático simplificado y plantear alternativas de aprovechamiento de agua en zonas conflictivas, resultó un estudio muy completo desde el punto de vista de la hidrología subterránea, pues después de abordar aspectos geológicos, piezométricos, determinar volúmenes de extracción, características hidrodinámicas y balance de las aguas subterráneas, se aplicó el modelo PLASM, derivado del Prickett y Lonquist, adaptado por el Consultivo de la CNA, con el cual se investigaron distintas alternativas de reordenación y manejo que teóricamente permiten recuperaciones piezométricas en el área urbana de Toluca y la zona industrial.

En ese mismo año de 1992 la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del DDF, a través del Grupo Herram, realizó un estudio regional de los Valles de Toluca e Ixtlahuaca, con objetivos consistentes en evaluar las características y condiciones hidrogeológicas en los valles señalados, a fin de corroborar y estructurar los modelos conceptual y de funcionamiento de los acuíferos; establecer los efectos generados por las extracciones de agua subterránea, especialmente en las áreas donde opera la batería de pozos de la DGCOH; delimitar las estructuras y unidades del subsuelo aprovechables como acuíferos y realizar un balance de aguas subterráneas de la zona, cuantificó el volumen de extracción en 448 Mm³ con un total de 914 aprovechamientos censados entre pozos, norias y manantiales, es probablemente el estudio geohidrológico más completo de la zona que nos ocupa, un buen levantamiento geológico, 32 SEV en una prospección geofísica, de los cuales tienen interés las secciones 1, 2 y 3 para el Valle de Toluca, el censo de aprovechamientos y sus extracciones, con buena amplitud los aspectos piezométricos, calidad del agua y

caracterización hidrogeoquímica, un modelo conceptual del funcionamiento del acuífero y un balance hídrico que integra la evaporación calculada por varios métodos (Thorntwaite, Blanney-Criddle, L-Turc y Penman).

En el año de 1993, Figueroa llevó a cabo una actualización de los acuíferos de Toluca e Ixtlahuaca ⁽¹²⁾, que consistió principalmente en el censo de aprovechamientos del agua subterránea y las correspondientes extracciones por usos, llegando a un total anual de 332 millones de metros cúbicos, aborda un tema por más interesante, como son los efectos de la sobreexplotación de los acuíferos locales, y que además de los abatimientos piezométricos que encarecen paulatinamente el bombeo, origina asentamientos y agrietamientos del terreno. Finalmente, en el año de 1996 la Cía. Ariel Consultores S.A. realizó un el Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de las Redes de Observación del Acuífero Valle de Toluca, el determinó el balance geohidrológico y el modelo de simulación y predicción de flujo hidrodinámico principalmente, llegando a los siguientes resultados: Entradas de 256.5 Mm³. Salidas de 342.0 Mm³. y un cambio de almacenamiento de -85.5 Mm³. Esta información fue relevante para la elaboración del presente sustento técnico.

3. FISIOGRAFIA

3.1 Provincia fisiográfica

El Valle de Toluca se localiza dentro de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico según Raisz, la cual se caracteriza por una serie de manifestaciones volcánicas, las más importantes del país, que dieron origen entre otros aparatos al Popocatepetl, Iztaccihuatl y Nevado de Toluca, a cuyos pies tiene asiento Toluca, capital del estado de México.

Comprende un extenso valle con elevaciones del orden de 2,600 msnm y ocupa una superficie de alrededor de 700 km², estando constituido por materiales aluviales y lacustres interdigitados con derrames volcánicos. Dicho valle está rodeado hacia el oriente, sur y poniente por elevaciones topográficas formadas por rocas de origen ígneo, como la sierra andesítica y basáltica de Las Cruces, con elevaciones entre 3,600 y 3,800 msnm, y el Nevado de Toluca a más de 4,000, con una superficie aproximada de 2,000 km².

3.2 Clima

En relación con el clima imperante, según Köppen y E. García ⁽¹⁵⁾, para el valle de Toluca se clasifica como templado, subhúmedo con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 mm. Hacia las estribaciones del Nevado de Toluca se torna a semifrío, subhúmedo y con lluvias de verano, con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 mm y 10.2 mm.

La temperatura media anual considerando todo el valle varía entre 12° y 13° C; en los meses de diciembre y enero es del orden de 9.5° C, a partir del cual se va incrementando hasta mayo, mes en que se registran temperaturas medias cercanas a 14° C, para volver a descender gradualmente hasta diciembre. En la tabla II.1 se presenta la temperatura mensual y anual medias registradas en la estación climatológica Toluca, que puede considerarse representativa de la región bajo estudio período 1921-1966. La temperatura media resulta de 12.2° C en el año y los valores extremos de 13.3 y 10.5° C, también como valores promedio.

Respecto a la precipitación pluvial, la media anual está entre los 800 y 1,000 mm para el valle de Toluca; la estación más representativa, la de Toluca, registra 785 mm/año (tabla II.2), con valores extremos de 1,183 y 776.4 mm/año, también como valores promedio. Hacia las faldas del Nevado la precipitación se incrementa a 1,200 y 1,400 mm anuales. La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, siendo más intensa los meses de junio a septiembre, con valores cercanos a unos 140 mm mensuales. El estiaje tiene lugar entre noviembre y abril, con precipitaciones del orden de 12 mm/año.

La evaporación potencial en el período 1972-1991 resulta de 1,700 mm anuales en la porción noroeste del valle, disminuyendo hacia el sureste con valores del orden de 1,500 mm/año; hacia el Nevado se presentan valores menores, de 800 mm/año, estacionalmente manifiesta las siguientes características: los valores menores, de unos 90 mm mensuales, se presentan durante octubre a enero, para después incrementarse progresivamente hasta alcanzar máximos de unos 150 mm/mes entre marzo y abril, para nuevamente ir disminuyendo hasta septiembre.

3.3 HIDROGRAFÍA

Región hidrológica y cuenca

En relación con la hidrografía superficial, la zona estudiada queda comprendida dentro de la Región Hidrológica No.12, en la cuenca del Río Lerma. El escurrimiento superficial más importante es el colector principal del río Lerma. Hace todavía algunos años se originaba con los manantiales que formaban las lagunas de Almoloya del Río, Lerma y San Bartolo, constituyendo las tres una zona lacustre en proceso avanzado de senectud. Con el paso de los años y la explotación excesiva de los acuíferos, han desaparecido los manantiales y las lagunas, pero en cambio, ahora el cauce del Río Lerma recibe aportaciones importantes de las aguas residuales de Toluca y poblaciones vecinas, así como del corredor industrial Toluca-Lerma, representando actualmente una de las cuencas más contaminadas del país en su tramo Lerma-Atlacomulco (18).

Infraestructura hidráulica

La presa José Antonio Alzate, cuyo uso principal es el control de avenidas y almacenamiento para riego cuenta con una capacidad de 35.3 Mm³. La presa Ignacio Ramírez, para control de avenidas y de riego, se localiza en la porción noroccidental del Valle de Toluca, con 20.5 Mm³ de capacidad, se alimenta de los ríos Almoloya de Juárez, El Rosario y La Gavia, así como de los arroyos San Cristóbal y San Diego respectivamente, las descargas de la presa Ignacio Ramírez prosiguen por la prolongación del cauce del río La Gavia hasta entroncar con el río Lerma, la superficie regada entre ambas presas es de 8,000-00-00 has. Para beneficiar al Distrito de Riego 033 en el valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco-Temascalcingo.

Hidrografía

A partir del poblado de Lerma el cauce del río sigue una dirección más o menos franca hacia el norte, atravesando el valle de Ixtlahuaca hasta arribar a la ciudad de Atlacomulco, del Nevado de Toluca desciende el Río Ojo de Agua con dirección oriente hacia San Antonio la Isla, desembocando en la laguna Almoloya del Río, nacimiento antiguo del Río Lerma, donde también se concentran escurrimientos provenientes de la vertiente de la Sierra de Las Cruces, también del Nevado descienden en forma radial los siguientes escurrimientos: Río Verdiguél que atraviesa

Toluca y descarga finalmente en el Lerma junto con las aguas residuales de la ciudad, otro principal afluente es el Río Tejalpa, además de los ríos y arroyos provenientes de la vertiente occidental de las Serranías, así mismo por la parte oriental provenientes de la sierra de Montealto y las Cruces con prolongación hacia el norte, descienden los ríos Ocoyoacac, Mayorazgo, Oztolotepec y el arroyo Temoaya entre otros, aportan al Lerma por su margen izquierda y descargan aguas arriba del embalse de la presa José Antonio Alzate

3.4 Geomorfología

La forma del relieve característico son las Sierras constituidas por materiales volcánicos que delimitan al Valle de Toluca y sus partes planas formadas por materiales de relleno como clásticos, piroclásticos de tipo lacustre y materiales de aluvión. Las Sierras orientales que limitan al Valle de Toluca están formadas por rocas andesíticas del Terciario Superior, afectadas por intemperismo y erosión que han formado suelos residuales al pie de sus taludes, como la sierra Montealto-Las Cruces, Apisco y Catedral, con orientación NW-SE y con alturas máximas del orden de 3,800 msnm. El drenaje superficial observado es del tipo paralelo y forman el parteaguas entre las cuencas de los valles de México y Toluca. Hacia el sur se aprecian los cerros de Loma Alta y Tenango, junto con el Nevado de Toluca con altura de 4,565 msnm, constituido por rocas andesíticas del Terciario Superior, flujos de piroclásticos y derrames de lava del Cuaternario. Al sur y oeste del Nevado, la sierra del Ajusco y las serranías que se desarrollan hacia Valle de Bravo y El Oro, representan el parteaguas topográfico entre la cuenca del Balsas-Mezcala y del Alto Lerma. En las sierras del occidente, sobre todo los materiales de la Formación Tarango, tienen de media a alta permeabilidad, por lo que funcionan como zonas de recarga a los acuíferos de la planicie. Presentan un drenaje paralelo dendrítico condicionado a las características geológicas estructurales que manifiestan. Los agentes que han afectado el relieve topográfico han sido endógenos como el vulcanismo reciente y exógeno como la erosión pluvial.

En las partes bajas, aunque el relieve es generalmente plano, se aprecian lomas, conos, derrames de lava y el valle se encuentra en una etapa de rejuvenecimiento dentro del ciclo geomorfológico. Los conos cineríticos compuestos por materiales permeables tienen un drenaje radial con pendientes pronunciadas, funcionando como zonas de recarga a los acuíferos de la planicie.

4. GEOLOGIA

La zona de estudio se ubica en la denominada cuenca del Alto Lerma, dentro del marco que impone el Eje Neovolcánico, lo implica una importante actividad volcánica reciente donde las rocas aflorantes presentan edades que van del Terciario Medio (26 millones de años) al reciente que se manifiesta por la presencia de complejos volcánicos en las partes altas constituídas por basaltos y andesitas, materiales piroclásticos que se encuentran bordeando las sierras, incluyen tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas, conos cineríticos, derrames lávicos, lahares y materiales producto de la desintegración y erosión constituidos principalmente por arenas, gravas, arcillas limos y depósitos lacustres.

El Valle de Toluca es una planicie constituida por materiales lacustres, producto de los diferentes lagos que se asentaban en la cuenca, así como por depósitos aluviales interdigitados con materiales piroclásticos. El Terciario contribuyó con una gran cantidad de rocas volcánicas de composición ácida a intermedia, como las Andesitas Xochitepec y la Formación Las Cruces, en forma de serranías bordeando el valle los cuales constituían antiguamente cuencas endorreicas, en donde se depositaron importantes volúmenes de materiales granulares y piroclásticos de la Formación Tarango, como relleno de una topografía preexistente. La dinámica propia del ambiente tectónico regional, dio lugar a la formación de extensas fallas y una densa red de fracturamiento que afecta a toda la secuencia estratigráfica.

4.1 Estratigrafía

La descripción de las unidades litológicas se basó en el levantamiento del Grupo Herram de México, 1992 por estar un poco más detallado, pero coincide sensiblemente con el reportado por la DGCOH ⁽¹⁰⁾. Por tal razón se respetó la simbología adoptada, y la descripción de las unidades litológicas se hará en orden cronológico, desde la más antigua a la más reciente. Ciertamente la descripción de las unidades estratigráficas resulta parca, pero corresponde a la del levantamiento citado, que de por sí es más escueta, igualmente parca es la que reporta el manual de la DGCOH.

Las unidades hidrogeomorfológicas son básicamente las serranías y las planicies; en las primeras se consideran las del oriente, sur y occidente, que contienen en sus formas una o varias unidades litoestratigráficas, con características de permeabilidad

diferentes, lo que las hace funcionar en forma distinta desde un punto de vista geohidrológico; es decir, se consideran como barreras o fronteras al flujo del agua subterránea aquellas con permeabilidades muy bajas, como las Formaciones Las Cruces y Xochitepec, o bien, como zonas de recarga, en general aquellas con permeabilidades que varían de a medias a altas, como las formaciones Chichinautzin, Tarango, los conos cineríticos y derrames lávicos del Cuaternario, los cuales, hacia las partes bajas y por debajo del nivel de saturación, se constituyen en buenos acuíferos (Figura 2). Las planicies intermontanas, ocupadas por depósitos lacustres, piroclásticos y aluviales de gran espesor, con permeabilidades de medias a altas, se han constituido en los principales acuíferos regionales que se explotan actualmente.

Complejo volcánico, andesitas Xochitepec y basaltos antiguos (Tomv).

Las andesitas Xochitepec son corrientes de lavas, aglomerados, brechas, piroclásticos y tobas de composición riodacítica, dacita y andesítica, se les asigna una red correspondiente al Terciario Medio, (Oligoceno al Mioceno). Mooser (1962), propuso el nombre a este complejo volcánico.

En general las lavas, aglomerados y brechas están poco fracturadas, y los piroclastos y tobas presentan consolidación media a alta en las zonas afectadas por los sistemas de fallas regionales donde el fracturamiento es de alto grado. Sus afloramientos se localizan dispersos en las partes sur y poniente de la cuenca, constituyendo parte de las elevaciones que la limitan por esos sitios, junto con los cerros que se ubican en las inmediaciones de la ciudad de Toluca.

Los basaltos antiguos agrupados con las andesitas Xochitepec, son basaltos alterados, compactos y masivos, con escaso fracturamiento y un denso drenaje dendrítico. Se les asigna una edad del Mioceno, tanto a las andesitas como a los basaltos antiguos se les clasifica como unidad acuífuga.

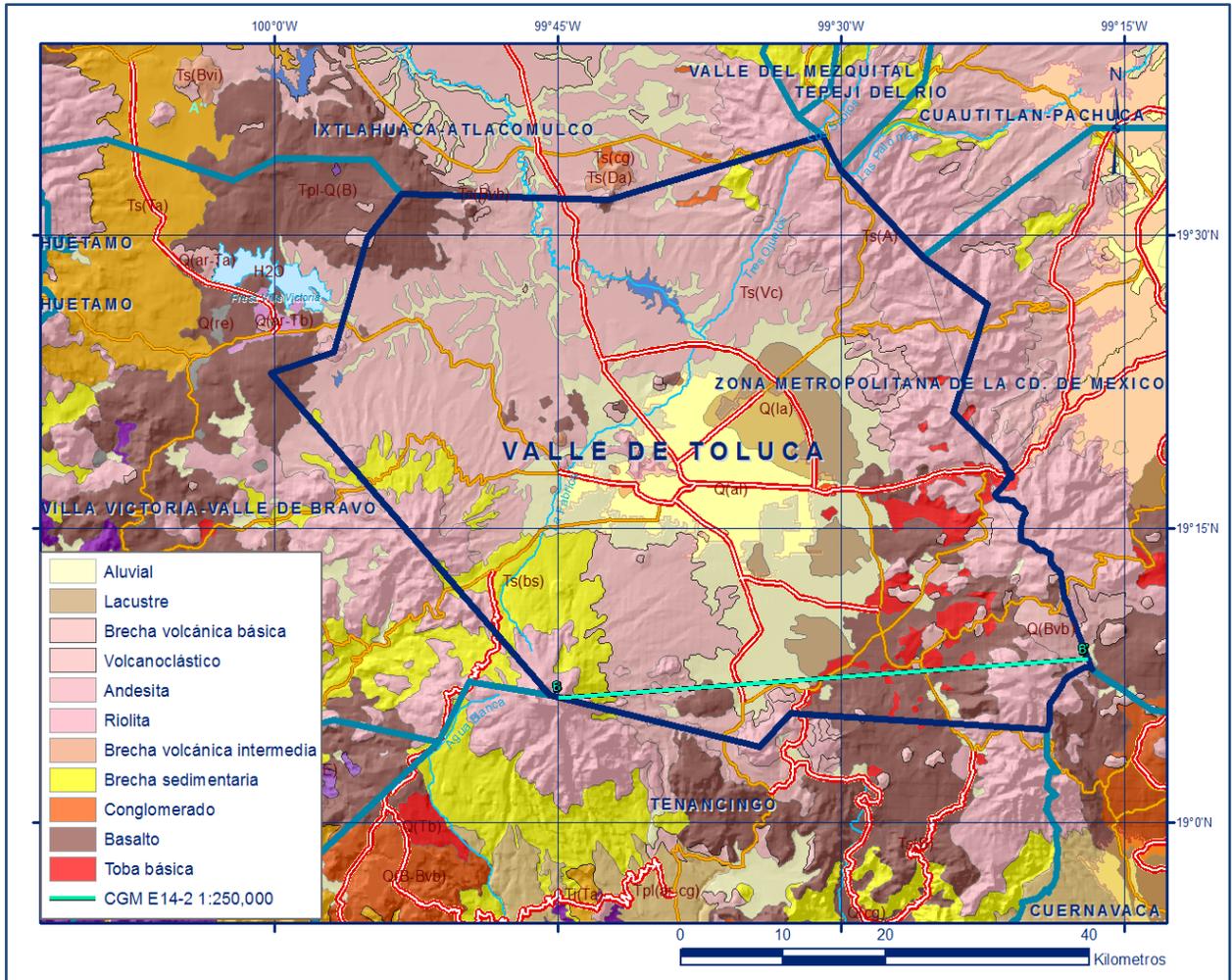


Figura 2. Geología general del acuífero

Andesitas (Tpv)

Con este nombre se agrupan a los derrames de lavas, aglomerados, brechas y tobas de composición andesítica y dacítica principalmente, en general las lavas y aglomerados se hallan pobremente fracturados, excepto en algunas pequeñas áreas de la porción norte, donde si están densamente fracturadas; las brechas y tobas manifiestan consolidación media a alta, clasificándose a esta unidad como acuífuga, sus afloramientos principales se observan en la porción SE del valle, aunque también aparecen al NW y norte, más bien hacia el valle de Ixtlahuaca. Su edad corresponde del Plioceno Inferior a Medio.

Formación de las Cruces (Tomc)

Es un conjunto de rocas volcánicas constituidas por lavas, aglomerados, brechas, piroclásticos y tobas de composición andesítica, dacítica y andesítica-basáltica, cuyos afloramientos constituyen la cadena montañosa que limita a la cuenca por el oriente, sierras Monte Alto-Las Cruces.

La edad que se les asigna corresponde del Mioceno al Plioceno. Los materiales del Plioceno-Cuaternario, los más recientes, manifiestan innumerables fracturas de enfriamiento, en tanto que las más antiguas son más compactas, excepción de las zonas afectadas por fallas, donde el fracturamiento es mayor. En general su permeabilidad es baja, razón por la que se clasifica a esta unidad como acuífuga.

Formación Tarango (Tpt)

Está compuesta por tobas, flujos de piroclastos, horizontes de pómez, aglomerados, gravas volcánicas y capas delgadas de pómez, lavas de composición principalmente andesítica y aluviones antiguos constituidos por gravas, arenas y limos que Bryan (1948) llamo precisamente Formación Tarango, por la localidad donde fue identificada, en una de las barrancas al poniente del Valle de México. Aflora en la Serranía al oriente del Valle de Toluca y se le asigna una edad del Plioceno Superior.

En general las lavas y aglomerados presentan escaso fracturamiento, los piroclastos y tobas manifiestan mediana consolidación, mientras que los horizontes de pómez y aluviones la consolidación varía de nula a media. Sus afloramientos se hallan ampliamente distribuidos en la porción septentrional de la cuenca en donde están constituidos por rocas ígneas. Los aluviones antiguos se localizan en el subsuelo, en la periferia del valle en su porción meridional, también aflora en las porciones nororiental y suroriental, ocupando estas últimas extensiones reducidas.

La heterogeneidad de sus materiales hace variar su permeabilidad en un rango muy amplio, pero en general se considera de buena a alta y de hecho representa un buen acuífero.

Domos andesíticos (Qa)

Con esta Unidad se inicia el Cuaternario, son aparatos volcánicos tipo domo, que afloran en forma aislada en el Valle de Toluca, como producto del vulcanismo reciente originado por el intenso fracturamiento regional, son de composición andesítica y andesítico-basáltica.

La pequeña extensión que ocupan estos afloramientos, además de su baja permeabilidad, hacen que se le clasifique como una unidad acuífuga.

Flujos del Nevado de Toluca (Qn) (Qtbn)

El vulcanismo del Nevado de Toluca fue intermitente, alternando emisiones con períodos de reposo, entre los cuales se presentaron períodos de erosión, terminando con expulsiones de tobas que forman la cubierta baja del volcán y se extienden al norte y oriente, cubriendo a la Formación Las Cruces, a la vez que forman las faldas y cuerpo del volcán.

Esta unidad está compuesta por tobas, piroclásticos, lavas y aglomerados de composición andesítica y andesítica-basáltica. En general las tobas y los flujos de piroclastos se observan sueltos o medianamente consolidados, las lavas y aglomerados están afectados por sistemas de fracturas espaciadas.

En general presentan altas permeabilidades, por lo que funcionan como zonas de recarga a los acuíferos de la planicie, es más, representa al área de recarga más importante por la extensión de sus afloramientos, su posición topográfica, alta permeabilidad de sus materiales y por la generosa precipitación pluvial que llega a los 1,000 mm/año.

Los flujos de piroclastos, lavas y aglomerados (Qn), se reportan en forma separada de las tobas andesíticas (Qtbn), pero al mismo tiempo agrupadas como “Flujos del Nevado de Toluca”, respetando el criterio del levantamiento original. Se les asigna una edad del Plioceno tardío al Pleistoceno.

Formación Chichinautzin (Qbc), derrames de basalto y conos recientes (Qb)

La Formación Chichinautzin (Fries, 1960), puede correlacionarse con los derrames de basalto y conos cineríticos. Los primeros afloran por Santiago Tianguistenco, Xalatlaco y Tenango, donde consisten de basaltos compactos y negros intercalados con materiales escoriacios y fracturados. Los conos volcánicos se identifican con mucha facilidad por su morfología, sus laderas poco erosionadas y la presencia de bosque denso. Las tobas y cenizas están sin consolidar.

Ambas unidades son muy permeables y representan zonas de recarga a los acuíferos de la planicie. Su edad corresponde del Pleistoceno al Reciente.

Tobas y arenas (Qtb) (Qtb-a)

Los depósitos de tobas lacustres afloran por todas las partes bajas del valle formando terrazas, fueron depositadas en medio arenoso y presentan intercalaciones de capas con diferentes granulometrías, se considera si no el mejor, cuando menos uno de los mejores acuíferos regionales. Su edad corresponde al Reciente.

Depósitos lacustres (Qla)

Estos depósitos del Reciente son sedimentos lacustres con predominancia arcillosa en su composición, están dispuestos en capas laminares muy delgadas. Afloran en las áreas que ocuparon las lagunas de Almoloya del Río y Mexicalcingo. Su permeabilidad es baja, pero no obstante representan acuíferos que se aprovechan por medio de numerosas norias.

Depósitos de aluvión (Qal)

Ocupan las partes planas del Valle de Toluca y están constituidos por los materiales de acarreo fluviales de diferentes tamaños, desde limos a boleos de composición andesítica-basáltica, andesítica y basáltica, los componentes más gruesos, del tamaño de gravas mayores, se ubican al pie de las elevaciones, las arenas gruesas con algunas gravas en los cauces de las corrientes superficiales y las arenas finas, limos y arcillas en las porciones más bajas de la cuenca.

4.2 Geología estructural

El valle de Toluca se localiza dentro de una zona tectónica que tuvo su origen durante el Terciario Medio-Superior, tanto este valle como el de Ixtlahuaca forman parte de la cuenca del Alto Lerma.

Se infiere que ambos valles fueron subcuencas endorreicas, con un drenaje radial y convergente hacia el centro de las mismas, actualmente están divididos topográficamente por una serranía que en el llamado Estrechamiento de Perales forma una garganta que las comunica y por donde pasa el río Lerma, que drena con rumbo NW hacia Atlacomulco, formándose de hecho una cuenca exorreica.

En general la cuenca del Alto Lerma está conformada estructuralmente como una serie de escalonamientos en forma de fosas, limitada por pilares que forman las serranías.

Las fallas más importantes que lo cruzan son la falla normal Tenango de Arista, con rumbo E-W y echado hacia el norte; la del Estrechamiento de Perales, también del tipo normal, con el mismo rumbo y echado que la anterior, y las de Boxipe, normales, con rumbo NW-SE y echado EN. Estos sistemas estructurales forman los citados escalonamientos, que descienden hacia el norte y noroeste, estando el primero de estos escalonamientos ocupado por el valle de Toluca.

4.3 Geología del subsuelo

El subsuelo del Valle de Toluca está bien conocido por medio de numerosas perforaciones y prospecciones, la mayoría de éstas del tipo geoelectrico resistivo.

Sección A-A'

Cruza al Valle de Toluca con dirección SW-EN, a partir del Nevado de Toluca hasta loma Endotzi, mostrando una secuencia litológica que comprende desde rocas volcánicas del Terciario (Tomv), en la base, hasta depósitos lacustres del Cuaternario en la cima. Se infiere un basamento de rocas calcáreas del Cretácico que fueron plegadas probablemente por el mismo evento que provocó el fallamiento de la secuencia estratigráfica del Terciario, dando lugar la formación de estructuras de bloque como pilares y fosas tectónicas, su profundidad debe ser del orden de 1,000

metros y desde luego no aparece en la sección, pues la profundidad de investigación llega apenas a los 450 m.

La secuencia se encuentra interrumpida por una estructura volcánica del Terciario (Tomv), llamado Cerro de la Teresona, que aflora como una caldera en la ciudad de Toluca, hacia la salida a Morelia y Avándaro.

En el Nevado de Toluca el espesor de los flujos y productos piroclásticos es superior a los 1,000 m, de los cuales sobreyacen a un importante espesor de rocas volcánicas terciarias (andesitas Xochitepec Tomv), así como a una secuencia de productos piroclásticos del mismo Período, principalmente tobas, brechas y aglomerados pertenecientes a la Formación Tarango (Tpt), cuyo espesor máximo a lo largo de esta sección es de 200 metros en el centro del valle, a la altura de San Diego de los Padres.

La Formación Tarango aflora en el extremo nororiental de esta sección, con un desarrollo aproximado de 7 km, donde se ubica el pozo R-16 con 160 m de profundidad, casi penetrante en forma total dentro de esta formación. En el centro de la sección la Formación Tarango subyace a una gruesa secuencia con aproximadamente 250 m de espesor en depósitos piroclásticos del Cuaternario, principalmente tobas y arenas (Qn, Qtbn, Qtba), con pequeños espesores de depósitos aluviales recientes (Qal).

Los pozos No. 37, 38, 40 y 41 ubicados a lo largo de la sección, penetran totalmente en los depósitos de tobas y arenas del Cuaternario (190 m), alcanzando a la Formación Tarango más allá de esa profundidad. Cabe aclarar que la denominada serie estratificada Tepozteco-Chalma no está definida.

Sección B-B

Esta sección cruza el Valle de Toluca con rumbo poniente a oriente, y comprende como puntos de referencia los poblados San Francisco Tlalcilcalpan, la ciudad de Toluca, Santa Ana Tlapaltitlan y San Miguel Ameyalco.

En la porción occidental de la sección aflora la Formación Tarango (Tpt), descrita hasta 200 m de profundidad por el pozo P-96 que en esta porción del valle penetra en dicha formación donde tiene un espesor de 300 m. Hacia la ciudad de Toluca se presenta una delgada secuencia de no más 100 m de depósitos piroclásticos del cuaternario

(Qn), cubiertos por depósitos aluviales recientes (Qal); estas secuencias están descritas por los pozos No. 83 y 205 llevados a la misma profundidad de 140 metros.

Posterior a la caldera de la sierra La Victoria descrita en la sección anterior (Tomv), se presenta la misma secuencia descrita por los pozos No. 202 y 95, con profundidades totales de 140 y 200 m, respectivamente; la Formación Tarango en esta parte de la sección se ubica a una profundidad máxima de 140 m y con un espesor aproximado de 300 m. Bajo el río Lerma los depósitos aluviales recientes (Qal), así como los depósitos piroclásticos (Qn), alcanzan hasta 300 m de espesor, correspondiendo a los mayores espesores interpretados a lo largo de la sección, mientras que la Formación Tarango llega incluso a desaparecer.

En el extremo oriental los pozos II Sorpasso, IB, 3A y 4B que alcanzan profundidades de 153 m, 243 m, 250 m y 248 m respectivamente, describen una secuencia desde su cima a su base con los siguientes materiales: basalto fracturado (Qbc), depósitos aluviales (Qal), de 80 a 150 m de espesor, depósitos piroclásticos (Qn), cuyo espesor varía de 40 a 160 m, y la Formación Tarango (Tpt), que sobreyace a rocas volcánicas del Terciario (Tomv), con espesores que fluctúan entre 0 y 80 m.

Sección C-C'

En el estudio en que se apoyan estas notas, la sección C-C' corresponde al valle de Ixtlahuaca, fuera del área estudiada en el presente, razón por la que no se incluyó.

Sección D-D'

Esta sección corre con dirección aproximada NE-SW, desde San Pedro Techuchulco hasta San Diego Alcalá, tocando las poblaciones de Santa Cruz Tepexpan, Alvaro Obregón, Villa Cuauhtemoc y Santa María.

En el extremo suroeste de la sección, los pozos 66A, 77A y 76A con profundidades de 310, 300 y 210 m, respectivamente, describen una secuencia litológica coronada por aluviones recientes con un espesor no mayor a 60 m y algunos lentes delgados de basalto, sobreyaciendo ambos depósitos a una gruesa secuencia de depósitos piroclásticos que incluyen tobas, lentes arcillosas y tobas del Cuaternario (Qtba), con espesores que fluctúan entre 10 y 350 m. El pozo 48A corta en su totalidad a una estructura volcánica reciente que supera, según la interpretación geofísica diferida los

450 m de profundidad. Más allá de esta estructura, los cortes litológicos de los pozos 34A y 31A cortan en los primeros 20 y 50 m a depósitos aluviales que sobreyacen a una secuencia de piroclásticos (Qtba) con 20 a 60 m de espesor, alcanzando finalmente a la roca volcánica cortada por el pozo 48A.

Los pozos 10A, Il Sorpasso y el No. 18, con profundidades de 240, 150 y 70 m, respectivamente, cortan hasta los 100 m de profundidad a los depósitos aluviales, siendo éstos los mayores espesores descritos en esta sección, además de un delgado lente de basalto del Cuaternario en la parte superior de los primeros pozos, mostrando también en su corte algunos lentes de arcillas entre los 50 y 100 m de profundidad; el espesor de los depósitos piroclásticos en esta parte de la sección, alcanza su espesor máximo con 350 m bajo el pozo 10A, los cuales sobreyacen a los depósitos piroclásticos de la Tarango con no más de unos 100 m de espesor. Dicho espesor se incrementa hasta la profundidad total alcanzada por el pozo No. 40, a 220 m.

Hacia el extremo nororiental de la sección, la Tarango aflora e indica un espesor máximo de 300 m, los cuales están afectados por una alta densidad de fracturamiento y fallamiento. Subyaciendo a toda esta secuencia se encuentran las andesitas del Terciario (Tomc), con espesores superiores a los 400 m, que representan la base de la secuencia a lo largo de esta sección.

5. HIDROGEOLOGIA

5.1 Tipo de acuífero

Las Unidades estratigráficas antes descritas para el Valle de Toluca, se han agrupado atendiendo a su funcionamiento geohidrológico en acuíferos, acuífugos y acuitardos.

Los acuíferos se han constituido en las siguientes unidades: Tarango (Tpt), flujos piroclásticos del Nevado de Toluca (Qn) (Qtbn), Formación Chichinautzin (Qbc) y Conos recientes (Qb), Tobas y arenas (Qtb) (Qtb-a), Depósitos lacustres (Qla) y Depósitos aluviales (Qal).

Cabe aclarar que los flujos del Nevado, la formación Chichinautzin y los Conos recientes funcionan más bien como zonas de recarga dada su nivel topográfico generalmente por arriba del de saturación, propiciando la infiltración del agua de lluvia y los escurrimientos superficiales; sin embargo, ocasionalmente pueden

funcionar como acuíferos someros, tal como lo demuestran numerosas norias excavadas a unos 20 m de profundidad en las laderas de los aparatos volcánicos, aunque en muchas de ellas se agota el agua en los meses más secos del año, abril y mayo.

La unidad Tarango también propicia infiltración en sus partes topográficamente más altas y que están por arriba del nivel freático; asimismo funciona como un buen acuífero en general, con permeabilidad variable, de media a alta, pero se distingue por presentar una mayor permeabilidad en el Valle de Toluca que en el Valle de México, según se afirma en el manual de la DGCOH, con base en pruebas de bombeo.

Se consideraron unidades acuifugas siguientes: Domos andesíticos (Qa), Complejo volcánico de andesitas Xochitepec, basaltos antiguos (Tonv) y Formación Las Cruces (Tomc), por su muy baja permeabilidad y que para fines prácticos en general se consideran impermeables, representan fronteras de los acuíferos, bien sean laterales o de fondo, según las condiciones de funcionamiento de los acuíferos libres, confinados o semiconfinados; en algunas partes presentan fracturación, lo que les confiere permeabilidad secundaria que propicia infiltración del agua de lluvia, pero no se sabe hasta que profundidad funciona de esta manera.

Como acuitardos se han considerado a las tobas lacustres que no afloran pero que están presentes en el subsuelo intercaladas en los depósitos lacustres y de aluvión, algunos materiales finos del Nevado y lahares de la Tarango, así como algunas áreas con arcillas lacustres.

La disposición de las unidades estratigráficas donde se han constituido los acuíferos, integran el sistema que controla el almacenamiento y movimiento del agua subterránea. En el Valle de Toluca estas unidades tienen una continuidad hidráulica que permite el desarrollo de sistemas de flujo regional interdependientes, característica que se prolonga al valle de Ixtlahuaca a través del estrechamiento topográfico de Perales; en otras palabras, aunque topográficamente sean prácticamente dos valles separados, desde el punto de vista geohidrológico no dejan de tener cierta interdependencia, criterio compartido desde la óptica de la hidrología superficial, pues se establece comunicación entre ambos valles a través del cruce labrado por los escurrimientos del Río Lerma.

MEDIO POROSO

El medio poroso está representado por los depósitos de clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del Valle de Toluca; su permeabilidad es función de la granulometría de sus granos entre otros factores y está representado por las siguientes unidades estratigráficas: tobas y arenas (Qtb) (Qtb-a), depósitos aluviales (Qal), lacustres (Qla) y la Formación Tarango (Tpt).

Otras unidades estratigráficas que constituyen un medio poroso son los flujos del Nevado de Toluca (Qn) (Qtn) y conos volcánicos recientes (Qbc), aunque más bien se consideran zonas de recarga a los acuíferos, tal como ya se mencionó.

MEDIO FRACTURADO

Las rocas volcánicas afectadas por el tectonismo y que manifiestan permeabilidad secundaria por fracturamiento, representan zonas de recarga importantes para los acuíferos de la planicie, o bien propiamente acuíferos constituidos en medio fracturado.

El medio fracturado está representado por las unidades estratigráficas siguientes: andesitas (Tpv), basaltos antiguos (Tomc), la formación Las cruces (Tomv) y Tarango (Tpt), las cuales en forma superficial y en algunas de sus áreas están afectadas por fracturas, aunque están consideradas en general como unidades acuífugas. La formación Chichinautzin (Qbc) es la que presenta un fracturamiento más amplio y definido por lo que se considera como área de recarga.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO

Atendiendo a las propiedades de porosidad y fracturamiento de las unidades litológicas, el sistema acuífero regional queda integrado a ellas, correspondiendo el acuífero superior al medio poroso y el inferior al fracturado. Funciona el primero en general como acuífero libre, bien como drenaje diferido, fracturado o manifestando efectos de recarga y el segundo como semiconfinado con fracturamiento.

Precisamente en el subsuelo de las planicies se ha logrado determinar por medio de perforaciones y prospecciones geofísicas, a sea desde un punto de vista geológico, la presencia de acuíferos; uno superior, funcionando como libre, descansa sobre unas

tobas de baja permeabilidad que actúan como acuitardo, las que a su vez yacen y confinan físicamente al acuífero inferior que debe funcionar hidráulicamente como confinado o semiconfinado.

Este esquema del sistema acuífero regional tiene como fronteras laterales a las sierras perimetrales del valle de Toluca, manifestando continuidad geológica únicamente a través del estrechamiento de Perales y hacia al valle de Ixtlahuaca, comunicación que debe ser somera.

Atendiendo a lo descrito en lo que va del capítulo se presenta la tabla IV.1, que resume las características de las unidades hidroestratigráficas con un criterio cualitativo.

5.2 Parámetros hidráulicos

De las pruebas de bombeo efectuadas en estudios anteriores, se cuentan con datos de 12 pruebas interpretadas por métodos convencionales cuyos resultados se consignan en la tabla IV.2 el objetivo de estas pruebas fue el de determinar la conductividad hidráulica a partir del cociente T/b (Transmisividad entre espesor del acuífero), con base en estas pruebas de bombeo fue posible determinar los siguientes parámetros hidrodinámicos para el Valle de Toluca.

Las transmisividades fluctúan entre $0.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a $0.82 \text{ m}^2/\text{s}$, donde los valores más altos se localizan hacia el extremo suroriental y norte del valle, correspondiendo al pie del monte de las sierras limítrofes. Hacia el área del Canal de Lerma, la transmisividad es del orden de 3.8 a $0.82 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

En la parte central del Valle las transmisividades son del orden de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y hacia el occidente de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ al sur de Almoloya y al oriente de la presa A. Alzate se localizan los valores más altos de esta propiedad, en base a los resultados anteriores se aprecia que la mayoría de los pozos manifiestan acuíferos confinados o semiconfinados.

Los caudales específicos oscilan entre 1 y 10 lps/m en el valle al oriente del Canal del Lerma varían entre 2.36 a 121 lps/m; hacia el norte del área entre 4.20 y 116 lps/m y en Almoloya del Río entre 5 y 58 lps/m. Los valores máximos de 116 y 121 lps/m corresponden a zonas de alto fracturamiento. Estas pruebas se reinterpretaron por medio del programa Groundwater for Windows ⁽⁶⁾, el cual se basa en las ecuaciones

y soluciones analíticas clásicas de la hidráulica de pozos, propuesta por Theis, Jacob y Hantush.

TABLA IV.1 Características cualitativas de las unidades hidroestratigráficas.

Unidad		Permeabilidad	Porosidad	Espesor	Medio	Compactividad	Continuidad hidráulica
Acuífugas							
Basaltos y Xochitepec (Tomv)		Baja a muy baja	Nula		Masivo	Compacta	
Andesita (Tpv)		Baja a muy baja	Nula		Masivo	Compacta	
Las Cruces (Tomc)		Baja a muy baja	Nula		Masivo	Compacta	
Domos andesíticos (Qa)		Baja a muy baja	Nula		Masivo	Compacta	
Acuíferas							
Acuífero superior							
Tarango (Tpt)	Media a alta	Poroso	400	Granular		Media	Regional
Tobas y arenas (Qtb)(Qtb-a)	Media a alta	Poroso	300	Granular			Regional
Lacustres (Qla)	Media	Poroso	20	Granular			Regional
Aluviales (Qal)	Media	Poroso	200	Granular			Regional
Chichinautzin (Qbc)	Alta		300	Fracturada			Local
Acuífero inferior							
Tarango (Tpt)	Media a alta	Poroso	250	Granular y fracturado		Media	Regional
Acuitardo							
Tobas lacustres (no aflora)	Muy baja	Poroso	20	Granular y cementado		Compacta	Regional

Tabla IV. 2 Resultados de las pruebas de bombeo a partir de métodos convencionales, Valle de Toluca.

No. de Pozo	Q (m ³ /d)	Qe lps/m	Duración (d)	Método de Theis		Método de Hantush	
				Transmitividad (m ² /d)	S	Transmitividad (m ² /d)	S
5 ^a	4,071.17	2.36	0.43	151.65	4.41303E-05	72.76	0.001882407
16 ^a	3,132.00	3.63	0.41	329.97	0.005873052	86.59	1.35611E-05
42 ^a	7,547.04	58.23	0.41	35,595.00	0.02928242	30552.89	0.08016337
81 ^a	4,406.40	5.10	3.00	378.09	7.40402E-06	179.70	0.001934072
21	10,516.00	121.71	0.33	15,171.20	2.77E-13	758.56	1.38E-14
30	7,539.26	116.33	0.41	N/i	n/i	661.97	1.16E-25
36	3,656.45	4.20	0.43	329.10	4.26527E-05	219.54	0.000702041
50	10,281.00	19.67	2.33	1,730,826.00	1.12E-05	1049.09	4.00E-04
57	7,673.18	59.20	2.50	22,467.55	9.61E-16	1122.04	5.11E-17
61	6,436.80	21.28	2.27	1,298.10	3.70E10	136.41	1.11E-09
76	7,698.24	25.45	2.27	897.64	0.01693248	724.58	0.05634451
81	11,261.37	14.05	3.91	988.04	7.50738E-07	1.71	0.00357798

Las pruebas se dibujaron para el período de abatimiento, permitiendo así su comparación con las curvas tipo abatimiento-tiempo de diferentes modelos teóricos para determinar el tipo de acuífero y las condiciones de frontera que prevalecen, de acuerdo con las condiciones geológicas descritas. En cuatro de estas curvas se muestra el comportamiento de un acuífero libre con drenaje diferido; cabe mencionar que el desplazamiento de la curva se puede deber a efectos de recarga, a variaciones en el almacenamiento o recuperación incompleta debido a una extensión limitada del acuífero ⁽¹⁶⁾, o bien a la combinación de estos efectos mencionados; cuatro curvas se manifiestan como un acuífero libre fracturado; tres como acuífero libre con efectos de recarga; y una como acuífero semiconfinado con fracturamiento.

El método alternativo seleccionado, fue el modelo de flujo radial propuesto por Rathod & Rushton ⁽¹⁷⁾, también conocido como modelo de dos capas. Este método modela la curva tipo en base de datos reales de campo, empleando ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del agua, permitiendo al calibrarlo obtener tanto la conductividad hidráulica como el coeficiente de almacenamiento, además de las pérdidas hidráulicas que ocurren en el pozo; por lo tanto, se obtienen diversos valores de las características hidrodinámicas de las distintas unidades que conforman el sistema de acuíferos.

A partir de este modelo se aprecia que la unidad productora está constituida principalmente por los depósitos piroclásticos recientes (Qbc) y aluviones del Cuaternario (Qal), siendo el valor de la conductividad hidráulica prácticamente 1 m/d. Los valores de conductividad hidráulica para el acuífero superior resultaron dentro del rango de 1 a 16.5 m/día (tabla IV.3), en donde los pozos ubicados al norte del valle, penetran básicamente en la Formación Tarango, Se presentan las conductividades hidráulicas más altas en los sitios donde existe una alta densidad de fracturamiento y fallas.

Los valores de la conductividad hidráulica en la formación Tarango son función de la granulometría de la unidad productora, afectada por la presencia de tobas o bien de conglomerados interdigitados a través de su espesor y extensión, así como por la presencia de fallas o una alta densidad de fracturamiento.

Tabla IV.3 Resumen comparativo de los resultados de las pruebas de bombeo por métodos alternativos, Valle de Toluca.

MODELO .POZO No.	GWW			MODELO DE DOS CAPAS				
	Método	T/m ² /d	K(m/d)	Unidad	K(m/d)	B(m)	T(M ² /d)	Tipo de Acuífero
LN61	Theiss	1298.099	2.70E+01	Sup.	6.6	48	316.8	Acuífero libre fracturado
				Inf.	3.2	92.36	295.5	
LN76				Sup.	8.3	76.17	632.21	Acuífero semiconfinado con fracturamiento
	Hantush	724.579	9.51E+00	Inf.	8.2	50.81	416.64	
LN81	Theiss	988.03	5.80E+00	Sup.	1.2	170.32	204.384	Acuífero libre con drenaje diferido
				Inf.	2	220.68	441.36	
LN57	Theiss	22467.55	1.40E+02	Sup.	42	160.59	6744.78	Acuífero libre fracturado
				Inf.	17	189.41	3219.97	
LN50				Sup.	3	91.48	274.44	Acuífero libre con drenaje diferido
	Hantush	1049.094	1.15E+01	Inf.	2	400	800	
LS42A				Sup.	7.8	34.88	272	Acuífero libre con efectos de recarga
	OBS	30552.89	8.76E+02	Inf.	4.9	86.12	421.9	
LN36				Sup.	1.3	63.62	82.7	Acuífero libre con drenaje diferido
	Hantush	219.53	3.45E+00	Inf.	1	258.38	258.35	
LN30	Theiss		0.00E+00	Sup.	8.5	41.36	351.56	Acuífero libre fracturado
				Inf.	6.5	420	2730	
LN21	Theiss	1517.2	2.38E+01	Sup.	16.5	63.86	1053.69	Acuífero libre fracturado
				Inf.	13.9	341.14	4741.8	
LS81A				Sup.	1.5	121	181.5	Acuífero libre con drenaje diferido
	Hantush	179.7	1.49E+00	Inf.	0.5	165	82.5	
LS16A				Sup.	0.4	146	58.4	Acuífero libre con efectos de recarga
	Hantush	86.5493	5.93E-01	Inf.	1	240	240	
LSSA				Sup.	1.05	68.75	72.18	Acuífero libre con efectos de recarga
	Hantush	72.759	1006E+00	Inf.	0.3	262	78.6	

5.3 Piezometría

Actualmente existe una red de 40 pozos piezométricos y 4 pozos piloto operados por la GRAVAMEX desde el año de 1970, la configuración de los niveles estáticos alcanzada durante el periodo 1970-1995 se alcanzó un abatimiento del orden de 35 m lo que implica una velocidad de 1.4 m/año, como efecto colateral de la sobreexplotación del acuífero Valle de Toluca, se ha generado el problema conocido como hundimiento regional, el cual consiste en el descenso del nivel de la superficie por la consolidación de los estratos arcillosos principalmente. Siendo el Valle de Toluca, una región con una simple configuración topográfica en donde se ubican varios pozos a diferentes profundidades, es posible emplear los datos de elevación del nivel estático contra profundidad del pozo, como indicador de las condiciones potenciométricas ⁽¹⁴⁾.

El área aledaña a la Sierra de las Cruces en donde se ubican los pozos directamente sobre el Río Lerma se reconoce como área de recarga, mientras que aquellos ubicados sobre el mismo río, pero alejados del pie de la sierra, se encuentran en área de transición. El área de descarga de los diferentes puntos monitoreados, corresponde a la porción norte del valle, aledaña a las presas Ignacio Ramírez y José Antonio Alzate.

5.4 Comportamiento hidráulico

En la zona estudiada los aspectos piezométricos pueden analizarse con apoyo en las profundidades de los niveles estáticos de los pozos de bombeo, o bien en el estudio de la distribución piezométrica con respecto a la profundidad, por medio de las 62 estaciones piezométricas que tiene instaladas la GRAVM en el Valle de Toluca, así como los hidrógrafos más representativos, lo cual representa un método más preciso para definir las características del flujo subterráneo.

De hecho, en el presente trabajo fue utilizada esta última información mencionada, misma que se describe en incisos subsiguientes con mayor detalle, con base en las configuraciones de igual elevación a 150 m de profundidad y de evolución a esa misma profundidad, durante el sondeo practicado entre mayo y junio de 1970 principalmente. Estos datos son los más antiguos y confiables a nivel regional que sirvieron de apoyo al estudio de mencionado.

La presencia de manantiales, actualmente lloraderos en temporadas de lluvias, generalizados en las laderas de la sierra de las Cruces y su prolongación hacia el norte,

indican que el flujo subterráneo adopta en esta franja un sentido general oriente-poniente; sin embargo, una buena parte de este flujo ha sido interceptado por las baterías de pozos del DDF situados al pie de la sierra para abastecimiento de la ciudad de México. Esto ha invertido incluso el gradiente original, pues ahora los acuíferos de la planicie aportan a los pozos.

No se tuvo noticia de pozos brotantes, salvo el artesianismo de este tipo en piezómetros profundos de las estaciones piezométricas ubicadas en los alrededores de la presa Ignacio Ramírez, así como la porción SE del área estudiada, entre las estribaciones del Nevado de Toluca y la laguna de Almoloya del Río, no obstante que se ignora la altura que sube el agua sobre el terreno, pues el agua mana por las mangueras, es evidente que el flujo del agua subterránea se induce desde esta área hacia las partes más bajas del valle.

Lo anterior no implica la inexistencia de pozos brotantes, pues quizá no fueron censados, si se perfora en el área de artesianismo no resulten brotantes o cuando menos artesianos, pues las condiciones y mecanismos que justifican dicho artesianismo están presentes. Las áreas de recarga representadas por las serranías del NW y del norte inducen una infiltración del agua de lluvia hacia profundidades del subsuelo. Estos materiales se clavan hacia la planicie y están cubiertos por clásticos menos permeables que los confinan, tales como aluviones; como sus condiciones de saturación están a una elevación piezométrica mayor que las de los materiales aluviales de la planicie, están a una presión también mayor que será manifiesta cuando se perfora un pozo que alcance la profundidad a la que se hallan estas rocas.

Estos datos son los más antiguos y confiables a nivel regional que sirvieron de apoyo para el estudio de 1970 ⁽⁵⁾, donde se consignan configuraciones basadas en registros de estaciones piezométricas, para el nivel freático y la calculada exactamente a 150 m de profundidad, durante el sondeo practicado entre mayo y junio de 1970.

5.4.1 Profundidad del nivel estatico

Las profundidades máximas del nivel piezométrico registrado a 150 m de profundidad, se localizan en los alrededores de Toluca, hacia el Sur hasta el orden de 80 a 90 metros, en los alrededores del poblado Tlaltenango, en la porción Norte, entre 60 y 70 de profundidad, aunque en este caso es debido al efecto de la topografía, pues se localiza en las faldas de la sierras; los valores mínimos se localizan al Este en la zona de la

extinta laguna de Lerma, alcanzando la profundidad de un metro en la estación piezométrica número 159. En el área de la presa Ignacio Ramírez el nivel piezométrico brota como ya se ha mencionado anteriormente, denotando una zona de artesianismo, sin que éste se haya cuantificado. Hacia el centro del valle la profundidad promedio puede ser de unos 40 m aproximadamente.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La serie de planos sobre configuraciones de elevación piezométrica se inicia con la de las curvas de igual elevación de los niveles piezométricos regionales de 1970 ⁽⁵⁾, donde se aprecia que las elevaciones mayores corresponden a la curva 2,780 msnm, que se localiza al pie del Nevado de Toluca y disminuyen en dirección Noreste rumbo a la ciudad de Toluca, donde el flujo subterráneo se bifurca al Norte y al Oriente, este último rumbo marcado por la curva 2,650 msnm, desciende hasta la 2,570, a la altura de Lerma de Villada, donde desemboca el flujo alimentando a los acuíferos constituidos bajo la laguna de Almoloya del Río. El segundo flujo que proviene del Nevado se define a partir de Toluca mediante la curva 2,650 msnm y se dirige al norte hasta la curva 2,540, apuntando en dirección a Ixtlahuaca, a la altura de las presas Ignacio Ramíres y Antonio Alzate.

Es de mencionarse que en esta configuración se advierte una zona de artesianismo en el extremo Noroccidental del área estudiada, un poco al Sur de la presa Ignacio Ramírez, que se identifica donde las curvas de igual elevación se han dibujado con línea interrumpida. En realidad, no es posible fijar exactamente la posición de estas curvas, pues los piezómetros situados a profundidades cercanas a los 150 m, únicamente denotan dicho artesianismo brotante manando el agua por las mangueras respectivas, pero sin que se haya determinado la altura hasta donde pudieran ascender, pues no era práctico dar una altura mayor de 2 o 3 metros a la caja protectora de la estación piezométrica, ni se determinó la presión respectiva mediante manómetros.

Igualmente, en la porción Sur del área configurada, entre las faldas del Nevado de Toluca y la población de San Antonio la Isla, se manifiesta otra área de artesianismo brotante.

Para mayo de 1984 y para los 150 m de profundidad, la configuración muestra características similares a la configuración anterior en cuanto las zonas de recarga y

sentidos generales del flujo subterráneo, no así en cuanto a la posición de las curvas de igual elevación piezométrica, que han sido afectadas por la explotación de los acuíferos. El área urbana de Toluca, donde antes estaba cruzada por la curva de valor 2,670 msnm, para esta fecha aparece ocupada por la curva 2,600 msnm; en la porción Norte, a la altura de la estación radiomonitora, donde estaba la curva de 1,560 msnm ahora la ocupa la del valor 2,530, y así por el estilo en el resto del área configurada; sin embargo, se conservan en superficies más reducidas las zonas artesianas señaladas en la configuración de 1970.

En el estudio de 1992 ⁽¹¹⁾, se presenta una configuración de las curvas de igual elevación de los niveles estáticos de los pozos que muestra los flujos antes descritos: el flujo proveniente del Nevado que circula hacia el Oriente y llega hasta al pie de la Sierra de Las Cruces; asimismo, muestra el flujo que establece rumbo al Norte y hasta la cuenca del valle de Ixtlahuaca. Como resultado de una “ampliación de las observaciones”, se observa un flujo más que proviene del piamonte de Las Cruces y circula hacia el Poniente, donde es captado por la batería de los pozos del D.D.F. a pie de monte, tal como se comentó.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Analizando los planos consignados en estudios geohidrológicos, acerca de la evolución piezométrica en el Valle de Toluca, es interesante remontarse al período 1966-1970 ⁽⁵⁾, cuando la extracción por medio de pozos no era tan exagerada. Para la profundidad de 150 m, se presentan curvas que indican abatimientos de -1.00 a -10.00 m. Los valores mínimos se localizan en las porciones Suroeste y Oeste del valle, en las estribaciones de las sierras, en tanto que los abatimientos máximos en los alrededores de San Francisco Xonacatlán, al Oriente del valle, y entre las presas A. Alzate e Ignacio Ramírez. En el centro del valle, en la zona industrial, un poco al Oriente de la ciudad de Toluca, se marca un abatimiento piezométrico de -5 m, en tanto que la zona urbana de dicha ciudad es de -3 m.

En el período 1970-1984, los abatimientos más pronunciados se localizan entre el poblado Capultitlán y la ciudad de Toluca con -30 m, al igual que en dos pequeñas superficies localizadas en la porción norte de la configuración, entre las curvas con valor -5.00 m, así como en la porción NW, en las estribaciones de la serranía que limita al valle de Toluca al occidente. Puede afirmarse que, en promedio para todo el valle, el abatimiento piezométrico es del orden de unos -12 m.

Cabe señalar que los excesivos abatimientos registrados entre las presas Ignacio Ramírez y J. A. Alzate, seguidos por la formación de grietas en el terreno algunos años después, fueron los primeros avisos para suspender la operación de los pozos circundantes, a fin de asegurar la estabilidad de las cortinas de las presas.

Para el período 1984 a 1996, la evolución piezométrica también a 150 m de profundidad, el área urbana de Toluca y el corredor industrial colindante muestran abatimientos piezométricos de -10 m, denotando una disminución en la velocidad de abatimiento en general en la zona estudiada.

En la porción oriental, se aprecian recuperaciones piezométricas a lo largo de una franja colindante con las estribaciones de la sierra de Las Cruces, marcada por la curva con valor +1.00 m, pero que entre las poblaciones Lerma de Villada y Santiago Tianguistenco alcanzan los 4 m, como respuesta a la suspensión de varios pozos del D.D.F. que estaban alumbrando agua de mala calidad.

Acerca de las configuraciones piezométricas a la profundidad de 150 m, se marcan las zonas de recarga natural en las fajas transicionales entre las serranías y las planicies, para inducir un flujo subterráneo general SSW-NNE hasta el llamado estrechamiento de Perales, que comunica al Valle de Toluca con el colindante de Ixtlahuaca, por un lado, y por el otro, un flujo hacia el oriente hasta las estribaciones de la sierra Las Cruces, donde se formaron las lagunas que a su vez dieron origen al río Lerma.

Los abatimientos observados entre 1970 y 1996 llegan a unos -40 m como máximo en el área urbano-industrial de Toluca. En los últimos años se observan recuperaciones del almacenamiento subterráneo por las estribaciones de la sierra Las Cruces y Lerma de Villada, por la suspensión de algunos pozos del D.D.F.

La dirección principal del flujo subterráneo para ambos acuíferos es de sur a norte, flujo al cual se unen aportaciones radiales de las sierras circundantes. La salida natural se localiza en el estrechamiento de Perales, coincidente con el cauce del río Lerma.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

A partir de los resultados de los análisis físicos y químicos de muestras de agua alumbradas y recolectadas desde 1959, se tiene un panorama bastante amplio acerca

de la calidad del agua subterránea, otorgándole en todos los estudios geohidrológicos realizados, la categoría de excelente, casi siempre dentro de normas de potabilidad y con base en los índices químicos analizados.

Algunas interpretaciones hidrogeoquímicas regionales con apoyo en los sólidos totales disueltos, que resulta el índice más representativo, muestran que la salinidad varía entre 150 y 300 ppm en el valle de Toluca. Las curvas de menor valor definen, al igual que la piezometría, las zonas de recarga perimetrales del valle, aumentando sus concentraciones a medida que el agua subterránea se dirige hacia las partes bajas de las planicies, donde tienen lugar las curvas de máximas concentraciones.

Estas interpretaciones se basan en muestreos de norias y pozos someros y profundos, deduciéndose que los sistemas de flujo, tanto del acuífero somero como profundo, siguen las direcciones generales, aunque lo que se menciona a continuación no tiene aplicación para definir sistemas de flujo, que dé como constancia de un deterioro de la calidad del agua subterránea por contaminación de aguas residuales de la ciudad y de la zona industrial.

Desde 1986, se señaló un incipiente a moderado deterioro del agua subterránea por contaminación, cuyo origen es el desarrollo urbano e industrial de Toluca y su zona industrial, tal como se mencionó, donde ya se manifestaba la salinidad mayor y las concentraciones más altas de casi todos los índices químicos analizados.

En 1993 ⁽¹²⁾, se señaló la existencia de dos zonas problemáticas, una vecina a la Laguna de Almoloya y la faja que contiene el cauce del Río Lerma. En la primera debido a la existencia de turbas en la laguna, quizá asociada con hidrotermalismo, y desde luego con el sistema de flujo, cuyas concentraciones de sólidos totales disueltos se incrementaron de 500 a 1,500 ppm entre 1970 y 1992; y en la segunda, entre Ixtlahuaca y Atlacomulco, pero que debe de ser extensiva entre las poblaciones de Lerma e Ixtlahuaca, por la infiltración de aguas residuales de la ciudad de Toluca y alrededores, además de las descargas industriales del corredor Toluca-Lerma.

Una cosa similar debe de estar sucediendo a lo largo del río Verdiguél, que recibe también descargas de aguas residuales de Toluca y poblados vecinos antes de descargar en el río Lerma, poco antes de que, a su vez, dicha corriente descargue en la presa J. Antonio Alzate.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

En la zona de estudio correspondiente a la cuenca del Alto Lerma, se han hecho varios censos de aprovechamientos del agua subterránea, desde 1970 hasta 1992, que se han ido complementado y actualizando, ésta información se consigna en los censos levantados que incluyen el de 1969, 1983-1984 y 1992, este último actualizado a 1996. Entre los censos más confiables y que todavía tienen vigencia cuando menos parcial, está precisamente el realizado en 1970 por la extinta Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México ⁽⁵⁾, que comprende tanto a los aprovechamientos del D.D.F. para exportar agua a la Ciudad de México, como a los que clasifica “locales” por su aprovechamiento en el mismo valle de Toluca.

En la Tabla VI, donde se consigna un resumen de los resultados obtenidos en cada ocasión en que se actualizó el censo, se consigna la existencia de 344 pozos en total para 1970, donde predominan los de uso doméstico con 211; sigue el uso industrial con 72 y el agrícola con 42, siendo éstos los usos más importantes. Cabe aclarar que dentro de los clasificados como de uso doméstico, fueron considerados los pozos del D.D.F. que exportan el agua bombeada a la ciudad de México.

El censo realizado entre 1982 y 1984 por la DGCOH del DDF, reporta la existencia de 385 pozos, de los cuales sólo 284 estaban en operación cuando se levantó dicho censo. La clasificación por los usos a que se destinaba el agua alumbrada resulta más detallada que en el censo anterior.

El siguiente censo corresponde al año de 1992 y fue realizado por la DGCOH del D.D.F., que de hecho es una actualización del anterior, pues no reporta los pozos operados por la citada dependencia, mismos que se incluyeron en forma aparte. Este censo está consignado en el estudio de 1993 ⁽¹²⁾. Para entonces, se puede ver en la multicitada tabla VI que el número de pozos alcanza la cifra de 530. Analizando la clasificación de los aprovechamientos por usos a lo que se destina el agua alumbrada, para el potable fueron 324, industrial 77, riego 47, fuera de operación 64 y los restantes se encuentran en usos combinados.

Para el presente trabajó se actualizó otra vez el censo, considerando los cambios registrados principalmente por la DGCOH, los municipios, industrias y particulares, pues la extracción más importante está involucrada con el incremento de pozos de agua potable, que varía de 324 a 343 x 10⁶ m³/a, tal como se verá adelante.

En la tabla VI también se consignan las extracciones. Para 1970 de los volúmenes extraídos del subsuelo, el más importante el uso público-urbano con 290.25×10^6 m³/año; siguiendo el industrial con 26.96×10^6 m³/año; el agrícola con 11.61×10^6 m³/año; los usos combinados doméstico-agrícola con 4.15×10^6 m³/año y el doméstico-industrial con 0.34×10^6 m³/año, y el doméstico es insignificante. Los pozos que no se reportan con una clasificación fueron englobados en “otros” y se estimó que bombeaban 20.60×10^6 m³/año para dar un total de extracciones en el Valle de Toluca de 353.91×10^6 m³/año. Es interesante hacer notar que en la parte de este censo que corresponde al levantamiento local, es decir, excluyendo los aprovechamientos del D.D.F., el uso predominante era el que se destinaba al público-urbano.

Los volúmenes anuales de bombeo estimados para el censo de 1983-1984, resultaron de 116.07×10^6 m³/año; el uso más importante sigue siendo el público-urbano con 59.47×10^6 m³/año, aunque en el rigor debe sumársele el llamado doméstico-potable con otros 14.22×10^6 m³/año. No obstante lo anterior, parece que disminuyeron en forma sensible los volúmenes exportados a la Ciudad de México y que están involucrados en este uso doméstico.

Le sigue en orden de importancia las extracciones para uso industrial, estimadas en 22.91×10^6 m³/año, aunque también para este caso deben sumársele los correspondientes al uso doméstico-industrial, es decir 0.25×10^6 m³/año. Sin embargo, el total resulta menor al volumen estimado en 1970. A continuación queda el uso agrícola con 7.12×10^6 m³/año, aunque también deben sumársele una buena parte del volumen estimado para el uso doméstico-agrícola, con 8.09×10^6 m³/año. El resto de los usos representa una minoría que no vale la pena señalar. Llama la atención que para los pozos clasificados “fuera de servicio”, se consigna un volumen de extracción que en total fue de 19.61×10^6 m³/año; debe suponerse que se trata del volumen de extracción una vez reparadas las bombas, o bien antes de quedar fuera de servicio.

Para 1992 la extracción total fue estimada en 327.28×10^6 m³/año, correspondiendo 290.00×10^6 m³/año al suministro del agua potable; 21.00 millones de m³/año al industrial; 12.00 millones de m³/año al riego y para los usos combinados agua potable-riego con 1.29 millones de m³/año y agua potable-industrial con 1.76 millones de m³/año, deben repartirse las cifras señaladas, tomando en cuenta que el agua potable es menor el consumo.

TABLA VI.-CENSOS DE APROVECHAMIENTOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE TOLUCA

CENSO LERMA 70												
USOS												
No. de pozos	DOMES TIC	INDUST RIAL	AGRIC OL	PECUA RI	POT	DOM/I N.	DOM/A GR.	OTROS				TOTAL
344	211	72	42			3	5	11				344
Extracción anual	290,252,414	26,959,900	11,606,000	0	0	336,296	4,154,000	20,606,000				353,911,610
CENSO 1983-1984 POZOS EN OPERACIÓN												
USOS												
No. de pozos	DOMES TIC	INDUST RIAL	AGRIC OL	PECUA RI	POT.	DOM/I nd	DOM/A GR.	DOM/O TR	DOM/P OT	AGRI/P EC.	OTRO S	TOTAL
284	156	63	24	1		1	14	1	6	2	16	284
Extracción	59,474,108.2	22,913,218.8	7,117,585.2	28,800	0	252,288	8,093,469.60	368,640	14,222,736	272,160	3,332,880	116,075,886
CENSO 1983-1984 POZOS FUERA DE SERVICIO												
USOS												
No. de pozos	DOMES TIC	INDUST RIAL	AGRIC OL	PECUA RI	POT.	DOM/I N	DOM/A GR.	DOM/P OT	PEC/O TR	OTROS		TOTAL
101	33	10	19			1	5	2	1	30		101
Extracción	8,485,092.0	792,014,40	8,437,536.	0	0	141,912	1,751,760.00	0	0	0		19,608,314
CENSO 1992												
USOS												
No. de pozos	AGUA POT.	POT/RIEGO	RIEGO	INDUST RIAL	IND/A GUA P	SERVI CIOS	FUERA DE OP.	S/CLASI FICA	RECREATIVO			TOTAL
530	324	11	47	77	3	2	64	1	1			530
Extracción	29,000,000	1,292,976	12,000,000	21,000,000	1,762,994	120,888	0	730,720	473,040			327,380,618
CENSO 1996												
USOS												
No. de pozos												TOTAL
563	343	11	46	76	5	2	75	4	1			563
Extracción	290,125,506	1,292,976	12,156,984	20,938,142	1,699,922	120,688	0	630,720	473,040	327,438,178		327,438,178

Para el estudio de 1996 ⁽¹⁹⁾, el volumen anual de salidas es de $342.0 \times 10^6 \text{ m}^3$. Las entradas de $256.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales, resultando un cambio de almacenamiento de $-85.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Anuales.

Por otro lado, los datos recabados dan la impresión de que fue sobreestimado el volumen de extracción en 1970, porque el bombeo de los pozos catalogados en ese censo con uso doméstico, aún no llegaba a su máximo. La diferencia anterior parece corroborarla la estimación del censo 1983-1984, que bajo el mismo rubro “doméstico” resultó casi cinco veces menor.

Algo similar se puede comentar acerca de los usos industrial y agrícola, cuyas cifras manifiestan un descenso entre 1970 y 1993-1994, tendencia que se revierte en el siguiente período de 1993-1994 a 1996, con incrementos acordes con los días habidos en el número de pozos registrados.

Atendiendo a la presente actualización, el uso más importante es el suministro de agua potable para uso público-urbano mediante 403 pozos, cifra que incluye a los aprovechamientos del Gobierno del D.F.; le siguen en importancia el uso agrícola con 205 pozos; el industrial con 155 aprovechamientos; servicios con 29 pozos y otros usos múltiples con 56 aprovechamientos.

En total se tienen 848 pozos en operación, de los cuales 383 pozos son propiedad de la batería de pozos del sistema Lerma del Gobierno del D.F. y en total se extraen del Valle de Toluca un volumen anual de $422.344 \times 10^6 \text{ m}^3$.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En los trabajos de 1970 ⁽⁵⁾ y 1992 ⁽¹³⁾ se hicieron balances de agua subterránea, aunque incompletos, los resultados se concentran en la tabla VII, junto al balance representativo de las condiciones del 2000, realizado en el presente trabajo.

La ecuación general de balance se definió por la ecuación:

$$E-S = \pm \Delta S$$

dónde:

- E = Entradas al acuífero
- S = Salidas del acuífero
- ΔS = Cambio de almacenamiento

Para el caso que nos ocupa se desglosó de la siguiente manera:

$$E_s + I_1(LI) + I_2(Ag) = B + S_s \pm V_d * S$$

Dónde:

- E_s = Entradas subterráneas,
- S_s = Salidas subterráneas,
- I = Coeficiente de infiltración vertical,
- LI = Lluvia,
- A = Agua aplicada al riego,
- g = Extracción por bombeo,
- B = Volumen drenado,
- V_d = Coeficiente de almacenamiento.
- S

Las entradas y salidas subterráneas se determinan con la ayuda de las configuraciones piezométricas de 1996 midiendo la longitud de los canales de flujo y el gradiente hidráulico, además de utilizar los valores de transmisividad, estimándose un volumen total en 157.68 hm³ anuales, de los cuales 94.608 hm³ son provenientes del Nevado y 63.072 hm³. de la Sierra de Las Cruces.

La recarga vertical se debe a la infiltración del agua de lluvia principalmente, además de riegos para los cultivos servidos con agua rodada o con pozo e infiltración de los principales escurrimientos superficiales a lo largo de los cauces. En el balance para 2000 se consideró la precipitación de 800 mm/año y el volumen de retorno de aguas subterráneas aplicado al riego del 2% de una lámina de 3000m³/ha. respectivamente.

Los volúmenes de extracción por medio de pozos y norias principalmente, representan la salida más importante. Para 1970 la extracción estimada fue en 353.9 hm³ al año, en tanto que para 1992 fue de 327.4 hm³, para 1996 de 327.4 millones y para el 2000 de 422.344 hm³ (tabla IV.4).

El cambio de almacenamiento se obtuvo a partir de la evolución observada de los niveles estáticos en el estudio de 1991 ⁽¹³⁾, para el período 1985-1990 se determinó una evolución media de 14 m en el período y para 1984-1996 de 12 m, que aplicados al área de unos 1,900 km², resulta un volumen drenado de 1,900 millones de m³ anuales, con un coeficiente de almacenamiento de 0.045, el volumen proveniente a costa del almacenamiento es de 85.5 hm³ anuales (tabla VII).

El área del valle cubierta por el estudio es de unos 2,053 km², una lluvia de 800 mm anuales y un coeficiente de infiltración (Iv) de 0.067, la recarga vertical natural resultó de 110.0408 hm³/a. La zona de la Sierra de las cruces dio una recarga de 36.432 hm³ El Nevado de Toluca dio una recarga de 31.333 hm³ La recarga horizontal (Eh) se obtuvo al considerar un frente de unos 50 km, gradiente de 10/2,000 y transmisividad de 0.012 m²/s, proveniente del Nevado y un frente de 50 km, un gradiente 10/2,000 y una transmisividad de 0.008 m²/s, de la porción occidental, resultando esta carga de 94.608 y 63.072 hm³ anuales, respectivamente.

El volumen proveniente del almacenamiento desde 1970 a 1996, fue de 92.385 hm³/año, en promedio con un coeficiente de almacenamiento de 0.045, valor que resulta un poco mayor al 25% de la extracción. En el estudio de 1992 este valor se estimó en -40, en el estudio de 1996 de -85.5 hm³. La salida subterránea actualmente es prácticamente nula.

Substituyendo estos valores en la ecuación de balance, se obtiene una recarga total de 336.760 Mm³ y descarga total de 423.978 Mm³.

En la tabla VII se pueden comparar los resultados de los balances efectuados en los estudios anteriores mencionados y el realizado en el presente trabajo.

TABLA VII
Resultados del balance de agua subterránea
Valores en millones de m³ anuales

	1970	1992	1996	2000
ENTRADAS				
Entradas subterráneas (Nevado)			94.5	94.608
Entradas subterráneas (Cruces)			63.0	63.072
Total de entradas subterráneas		299.0	157.5	157.680
Recarga vertical natural		81.0	98.2	177.806
Recarga natural inducida			0.8	1.273
SUMAS	342.1	380.0	256.5	336.760
Rendimiento permanente				283.149
SALIDAS				
Salidas subterráneas	2.0	2.0	0.0	0.0
Extracción	353.9	327.0	327.4	422.344
Evapotranspiración		10.0	14.7	0.0
Descarga natural comp. Ríos, manantiales				53.611
SUMAS	355.9	339.0	342.1	475.955
CAMBIO ALMACENAMIENTO	-13.8	41.0	-85.5	-85.584
Coeficiente de almacenamiento			0.045	0.045
Coeficiente de infiltración			0.067	I1=0.067 I2=0.02

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{r} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} \\ \text{SUBSUELO EN UN} \\ \text{ACUÍFERO} \end{array} = \begin{array}{r} \text{RECARGA} \\ \text{TOTAL} \\ \text{MEDIA} \\ \text{ANUAL} \end{array} - \begin{array}{r} \text{DESCARGA} \\ \text{NATURAL} \\ \text{COMPROMETIDA} \end{array} - \begin{array}{r} \text{EXTRACCIÓN DE AGUAS} \\ \text{SUBTERRÁNEAS} \end{array}$$

Donde:

- DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero Valle de Toluca es de **336.8 hm³/año**,

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben de ser sostenidas para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes. Para el acuífero Valle de Toluca la descarga natural comprometida es igual a **53.6 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **411,915,560 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 336.8 - 53.6 - 411.915560 \\ \text{DMA} &= -128.715560 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **128,715,560 m³ anuales**.

9. Bibliografía y Referencias

- ¹ Servicios Geológicos, S.A. Estimación preliminar de los recursos de agua subterránea en la cuenca alta del Río Lerma hasta el estrechamiento de Atlacomulco. Julio 1996.
- ² Dr. A. Loehnberg. Plan que se propone para incrementar el abastecimiento de la ciudad de México por medio del sistema Lerma. DGCOH 1960.
- ³ Ing. Mario Veytia Barba. Estudio para la ciudad de Toluca. Sept. 1960.
- ⁴ Ing. Mario Veytia Barba. Estudio geohidrológico de la parte alta de la cuenca del río Lerma DGCOH dic. 1960.
- ⁵ Oficina de estudios especiales de la CHCVM-SRH los acuíferos del alto Lerma pub. No. 7, 1970.
- ⁶ Consultec, Ingenieros Asociado, S.C. Estudio del comportamiento de grietas en el valle del Alto Lerma CAVM-SARH, 1978.
- ⁷ Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. Actualización del levantamiento de grietas en los valles de Toluca e Ixtlahuaca-Atlacomulco, CAVM-SARH, 1977.
- ⁸ Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. Investigaciones geofísicas para la detección de grietas en los valles de Toluca e Ixtlahuaca-Atlacomulco CAVM-SARH, 1977.
- ⁹ Lesser y Asociados, S.A. de C. V. Geohidrología del valle de Lerma DGCOH, 1986.
- ¹⁰ Perforaciones Leor, S.A. Cuantificación de agua subterránea en el valle de Lerma, para determinar las causas de la disminución de caudales de extracción. DGCOH, 1989.
- ¹¹ Lesser y Asociados, S.A. Estudio para el diagnóstico del acuífero valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción del agua subterránea. GEM, 1992.
- ¹² M.en I. Germán E. Figueroa Vega. Actualización de la información de los acuíferos del Alto Lerma y la adaptación de su Modelo DAS al lenguaje Basic. CNA: 1993.
- ¹³ INEGI Censo 1995 Estados Unidos Mexicanos, resultados preliminares, 1996.
- ¹⁴ Mooser. Los ciclos del vulcanismo que formaron la cuenca de México, 1956.
- ¹⁵ Köppen y E. García Atlas Nacional del Medio Físico, SPP, 1981.
- ¹⁶ United Nations Ground Water for Windows, mar. 1995.
- ¹⁷ Rathod, K.S. and Rusthon, K.R. Interpretación de pruebas de bombeo en capas acuíferas, usando un modelo numérico. Reino Unido, 1990.
- ¹⁸ Boletín Hidrológico No. 50, Región Hidrológica No. 12 Dirección de Hidrología, SRH, 1970.
- ¹⁹ Ariel Consultores S.A. Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación del acuífero del valle de Toluca. CNA, 1996.
- ²⁰ Atlas Ecológico de la cuenca hidrográfica del río Lerma Tomos I,II,III. GEM,oct. 1997.