

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SOLTEPEC (2902), ESTADO DE
TLAXCALA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1 GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3 FISIOGRAFÍA	7
3.1 Provincia Fisiográfica	7
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía	8
3.4 Geomorfología.....	8
4 GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología Estructural	13
4.3 Geología del Subsuelo	15
5 HIDROGEOLOGÍA	15
5.1 Tipo de Acuífero.....	15
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad del nivel estático.....	17
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	21
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	22
7.1 Entradas.....	22
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2 Entrada por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3 Recarga incidental (Ri).....	24
7.2 Salidas.....	25
7.2.1 Bombeo (B).....	25
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.3 Descarga de manantiales (Dm).....	26
7.4 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8 DISPONIBILIDAD	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	27
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción (VEAS)	28
8.4 Disponibilidad media anual (DMA)	28
9 BIBLIOGRAFÍA.....	29

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera 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”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA. La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Soltepec, definido con la clave 2902 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del estado de Tlaxcala. En el límite con los estados de México, Puebla e Hidalgo, entre los paralelos 19° 26' y 19° 44' de latitud norte y entre los meridianos 98° 12' y 98° 43' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 820 km².

Limita al norte con el acuífero Apan, del estado e Hidalgo; al noreste con Tecolutla, del Estado de Veracruz; al este y sur con el acuífero Alto Atoyac, perteneciente al estado de Tlaxcala; al suroeste con Valle de Puebla, del estado de Puebla; al oeste con Texcoco y al noroeste con el Cuautitlán-Pachuca, ambos pertenecientes al estado de México. (Figura 1)

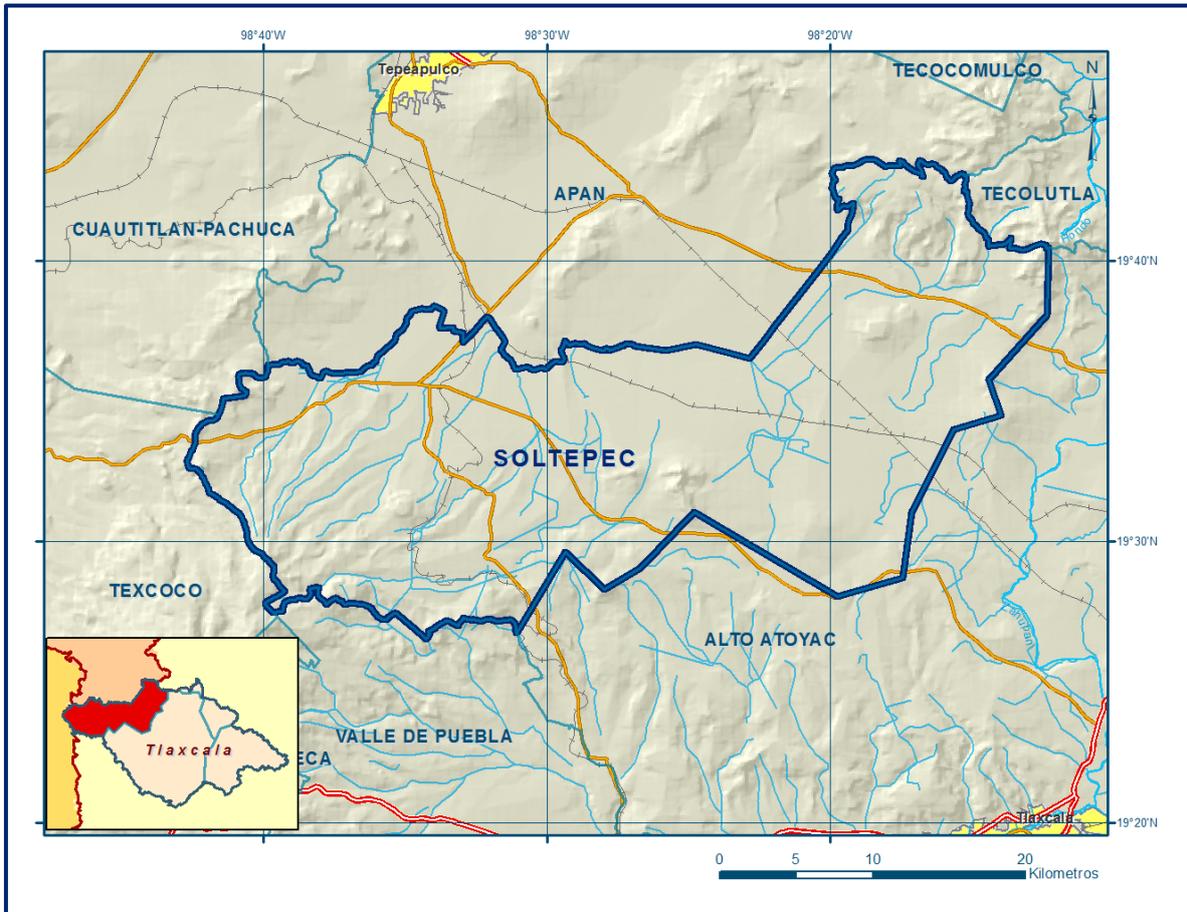


Figura 1. Localización del Acuífero

Geopolíticamente, el área del acuífero comprende totalmente por los municipios de Calpulalpan, Benito Juárez y Nanacamilpa de Mariano Arista, la mayor parte de Tlaxco, Sanctórum de Lázaro Cárdenas y Hueyotlipán.

Así como porciones pequeñas de Atlangatepec, Españaita, San Lucas Tecopilco y Muñoz de Domingo Arenas, todos pertenecientes al estado de Tlaxcala.

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

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	12	18.8	19	40	26.4	
2	98	12	22.7	19	38	2.8	
3	98	14	25.1	19	35	45.1	
4	98	13	59.7	19	34	29.5	
5	98	15	39.6	19	33	59.1	
6	98	17	8.7	19	31	2.2	
7	98	17	28.1	19	28	42.2	
8	98	19	46.7	19	28	2.2	
9	98	24	49.6	19	31	1.7	
10	98	26	42.4	19	29	3.3	
11	98	27	59.2	19	28	17.1	
12	98	29	21.5	19	29	37.0	
13	98	31	4.9	19	26	45.7	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	98	39	39.3	19	27	27.6	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	98	41	35.1	19	34	30.4	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	98	39	50.8	19	36	17.5	DEL 16 AL 17 POR EL LIMITE ESTATAL
17	98	15	17.5	19	43	0.5	
1	98	12	18.8	19	40	26.4	

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero Soltepec

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Soltepec pertenece al Organismo de Cuenca XIII “Aguas del Valle de México”, al Consejo de Cuenca “Aguas del Valle de México”, instalado el 18 de agosto de 1995, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Tlaxcala.

Su territorio se encuentra parcialmente vedado, casi en su totalidad sujeto a las disposiciones de dos decretos: El primero rige en la mayor parte de su superficie y es el “Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las cuencas de la lagunas de Tochac y Tecocomulco, en los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 17 junio de 1957.

En la región occidental está vigor el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida por Cuenca o Valle de México”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de Agosto de 1954. Ambas vedas son de tipo I, en las que la capacidad de los mantos acuíferos solo permite extracciones limitadas para usos domésticos. Sólo en pequeñas áreas de los extremos suroccidental, suroriental y nororiental no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

Sin embargo, dichas áreas se encuentran sujetas a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril

de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero Soltepec se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito ni unidad de riego alguna y a la fecha no se constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación se mencionan los estudios más recientes e importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE CALPULALPAN, TLAXCALA, realizado por G.C.A. en 1983 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

El estudio tuvo como objetivo determinar de manera preliminar las condiciones geológicas de la zona. Identifica cuatro unidades hidrogeológicas, de las cuales el terciario volcánico era la unidad que se explotaba principalmente, con niveles estáticos que variaban entre 80 y 150 m. Concluye que la recarga proviene de las sierras volcánicas ubicadas al suroeste y noreste, y que la descarga natural tiene lugar hacia la Laguna Tochac. La extracción fue estimada en 2.9 hm³ anuales año, inferior al valor más conservador que puede recibir de recarga, por lo que el acuífero se encontraba en equilibrio.

GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO. E. VAZQUEZ SÁNCHEZ Y R. JAIMES PALOMERA. REVISTA GEOFÍSICA INTERNACIONAL, VOL. 28 NUM. 2. 1989. En este artículo se presenta de manera más detallada la geología de la Cuenca de México, representada en un mapa geológico, así como 4 secciones geológicas elaboradas con información superficial y subterránea de pozos profundos exploratorios de PEMEX (Roma1, Texcoco 1, Mixhuca1 y Tulyehualco 1).

Los cuales llegaron a profundidades de más 2000 m, cortando rocas sedimentarias cretácicas correspondientes a las formaciones Morelos y Cuautla. También se describen datos geocronológicos obtenidos de las mediciones realizadas a diferentes formaciones. Finalmente, presenta un plano estructural en el que se muestran las principales fallas y estructuras.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE SOLTEPEC, TLAXCALA. Realizado en 2002 por Desarrollo y Sistemas. S. A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la recarga anual del acuífero, debido a que el acuífero Soltepec en realidad forma parte de un sistema acuífero que se ha denominado Apan – Tochac, en alusión a la cuenca hidrológica en donde se localiza dicho este sistema, también incluyó el acuífero Apan. El sistema acuífero se encuentra alojado en un área de 1,365 km² cuya delimitación coincide con el parteaguas de la cuenca del mismo nombre; está constituido por tres unidades hidrogeológicas, la primera y más importante es un acuífero constituido por sedimentos clásticos de alta productividad, la segunda unidad está constituida por rocas volcánicas y calizas con alto grado de fracturamiento y la tercera es una unidad hidrogeológica mixta o interdigitada.

Como parte de los trabajos de campo efectuados se realizó un censo de aprovechamientos, nivelación de los brocales de 70 pozos, 15 pruebas bombeo y se recolectaron 10 muestras de agua para análisis fisicoquímico.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO DE SOLTEPEC, EN EL ESTADO DE TLAXCALA. Realizado en 2014 por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C. para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, generar información hidrogeológica para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Así como identificar las causales de interés y utilidad públicos para establecer la fundamentación y motivación requeridas para la emisión del ordenamiento procedente que aplique en toda la superficie del acuífero. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, análisis de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizaran en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

Fisiográficamente la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz E., 1964). De acuerdo a la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1997), el área que cubre el acuífero se encuentra localizada en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por una serie de cadenas montañosas de origen volcánico y por su complejidad en la composición de las rocas que varía de basáltica a riolítica, producto de eventos lávicos y piroclásticos; las geofomas volcánicas presentan edades que varían desde mediados del Terciario al Reciente. Comprende parte de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, Estado de México, Tlaxcala, Distrito Federal, Hidalgo, Puebla, y Veracruz.

La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico" integrado por: Volcán de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (La Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19°; que representan el trazo de la gran Falla Clarión.

La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen algunas elevaciones y sierras formadas por estratovolcanes aislados

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero predomina el clima templado subhúmedo con invierno frío y régimen de lluvias en verano que representan menos del 5% del total anual, temperatura media anual entre 12 y 18 °C; solamente en una pequeña porción del suroeste del acuífero se presenta un clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual entre 5 y 12 °C, y porcentaje de lluvias invernales del 5 al 10.2 del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 15 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero, 11 localizadas

en territorio del estado de Tlaxcala: Mazapa, San Antonio Calpulalpan, Sanctorum, San Marcos, Zoquiapan, Calpulalpan, Escuela Agropecuaria Nanacamilpa,

El Rosario, Benito Juárez, Cuamantzingo y Hueyotlipan; 3 en territorio del Estado de Hidalgo: Potrerito, Charco del Zacatón y Emiliano Zapata; y 1 dentro del territorio del Estado de México: Xochihuacan; todas ellas con un registro histórico que comprende el periodo 1970-2013. Con ella se generó la configuración de isotermas, isoyetas y de igual valor de evapotranspiración, resultando valores promedio anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración de **659 mm, 14.2 °C y 502 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero Soltepec, se localiza en la Región Hidrológica 26 “Pánuco”, Subregión Hidrológica Alto Balsas, Cuenca del Río Moctezuma y en la subcuenca de la Laguna Tochac y Tecocomulco.

Los principales ríos son Barranca del Muerto, en la región oriental, y San Miguel en la porción nororiental, los cuales desembocan en la Laguna de Tochac, también conocida como Laguna de San Antonio de Atocha. Los principales arroyos son: Rayuela, Casa Blanca, El Rosario, El Capulín, El Columpio, Tízar, Achicapa, todos ellos de tipo intermitente. El Arroyo El Columpio aguas abajo se convierte en el Arroyo Calpulalpan y descarga sus aguas en la Laguna de Apan. El arroyo Tizar se localiza al noroeste de la cuenca.

Dentro del acuífero existen 265 cuerpos de agua, desde pequeños jagüeyes y bordos hasta pequeñas presas, la mayor parte de ellos son de carácter intermitente. Las presas más destacadas son: El Muerto, Bernales, Santa Rita, San Antonio, Pozuelos, La Cañada, Coecillos, San Juan. Las principales lagunas son: Cazadero, Tlalcorral, Ocotlán, Ángel Chico, Amantla y San Antonio Atocha.

3.4 Geomorfología

En la superficie que cubre el acuífero es posible observar dos etapas del ciclo geomorfológico; la primera indica una etapa de madurez y está representada por los valles intermontanos, donde se acumulan los depósitos de materiales aluviales. La segunda indica una etapa de rejuvenecimiento, representada por las zonas montañosas y arroyos en forma de “v”.

Debido al incremento de las pendientes topográficas las corrientes superficiales son torrenciales que erosionan con gran intensidad a las rocas por las que atraviesan.

En general, el drenaje es de tipo radial y subdendrítico; la cuenca es de tipo endorreico. El paisaje geomorfológico de la zona se caracteriza por estar constituido por sierras, lomeríos y planicies o llanuras aluviales.

Las sierras son de composición volcánica y se ubican al noreste y suroeste del acuífero. Los lomeríos redondeados son todos aquellos aparatos volcánicos distribuidos dentro de la cuenca, como son los cerros Soltepec y Tesoyo, ubicados al oriente, San Nicolás, Tlazala y Techalote, localizados al sur. Los lomeríos de colinas redondeadas con llanuras se presentan en la porción noreste y norte de la zona, en donde se localizan los poblados El Rosario, Casa Blanca, Mariano Matamoros, en el estado de Tlaxcala, Almoloya y Apan, en el Estado Hidalgo.

Los lomeríos de colinas redondeadas con cañadas se localizan únicamente al suroeste de Mazapa, Tlaxcala, en la zona del Cerro Yehualica.

Las llanuras de piso rocoso con lomeríos son la unidad más ampliamente distribuida en toda la porción centro-sur de la Cuenca Apan-Tochac, desde el valle de Soltepec, hasta la Laguna de Tochac, extendiéndose hacia el sur hasta las localidades de Ignacio Zaragoza, Benito Juárez, Tlaxcala y Francisco Villa, mientras que hacia la suroeste abarca la zona donde se localiza la Ciudad de Calpulalpan y las localidades tlaxcaltecas de San Marcos Guaquilpan y San Mateo Actipan.

En la porción hidalguense se extiende hasta la ciudad de Emiliano Zapata. Es justamente en esta unidad en donde se localiza la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea.

La unidad gran llano con lomeríos es muy similar a la anterior, de hecho a simple vista no se aprecian diferencias. Se presenta en las inmediaciones de las lagunas de Apan y Acopinalco, así como en los límites con el municipio de Tepeapulco.

4 GEOLOGÍA

La geología regional ha sido modelada por la actividad volcánica del Eje Neovolcánico, que le imprime su perfil característico. A nivel regional, predominan los afloramientos de rocas volcánicas de diferente composición: riolitas, andesitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de ellas. Existen además sedimentos lacustres y brechas sedimentarias (figura 2).

Las unidades estratigráficas más antiguas del estado de Tlaxcala, son las rocas sedimentarias calcáreas cretácicas, seguidas por los depósitos clásticos continentales de ambiente lacustre que, de acuerdo con su litología, son clasificados como asociaciones alternantes de areniscas, calizas y lutitas.

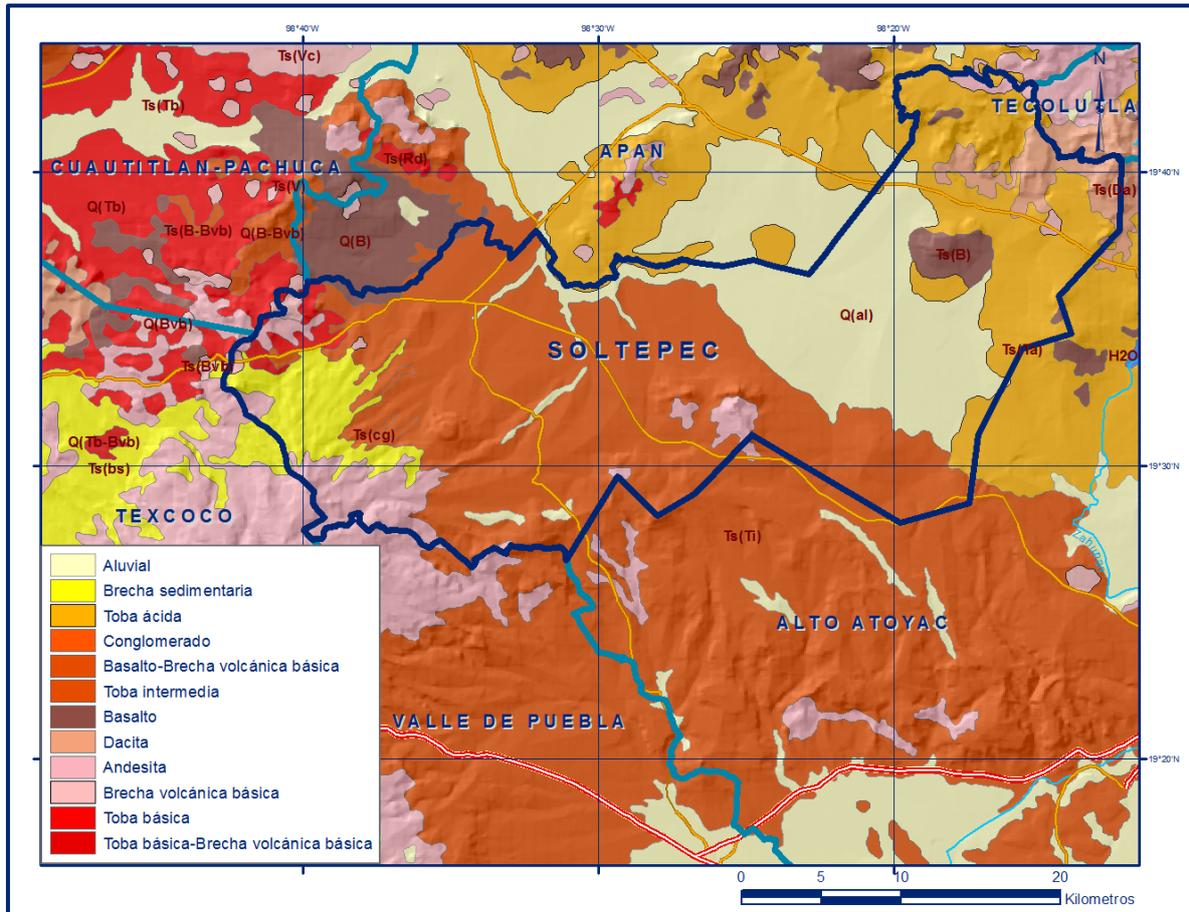


Figura 2. Geología general del acuífero

Es posible que estas rocas correspondan al Terciario Inferior ya que se encuentran cubiertas por derrames andesíticos y tobas intermedias del Terciario Superior (Mioceno). Las tobas ácidas, que afloran de manera aislada y restringida en la superficie del estado, pertenecen también al Terciario Superior (Plioceno).

En este mismo periodo, los agentes de denudación fluviales y fluvio-glaciares iniciaron una actividad intensa que condujo a la nivelación de un relieve activo. Así se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares (brechas sedimentarias) en las faldas de volcanes andesíticos como La Malinche, entre otros.

Durante el Cretácico imperó una estabilidad tectónica en la región que propició la precipitación de carbonatos permitiendo el desarrollo de la Formación Morelos. A principios del Terciario se interrumpe la sedimentación debido a la fase tectónica intensa de la Orogenia Laramide caracterizada por esfuerzos compresivos, ocasionando que los depósitos se plegaran y emergieran, posteriormente se erosionaran dando lugar al depósito de conglomerados.

Durante el Terciario Medio se produjeron emisiones volcánicas de composición riolítica, andesítica y basáltica. El vulcanismo ocasionó condiciones endorreicas de

la cuenca, permitiendo el depósito de materiales producto de la denudación en un medio lacustre. Posteriormente, durante el Plioceno-Pleistoceno, se presentó el doble fallamiento de Tlaxcala y Tetlatlauca, que provocó el fracturamiento que dio lugar a nuevas emisiones de lava y cenizas de composición basáltica formando conos más recientes, así como tobas arenosas.

En el Plioceno Superior las emisiones volcánicas disminuyeron y se depositaron tobas y abanicos aluviales; este fenómeno se presentó nuevamente durante el Cuaternario. Actualmente se siguen acumulando depósitos de origen aluvial y lacustre.

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigrafía de la región en la que se localiza el acuífero está constituida por rocas volcánicas de composición de basáltica a riolítica, y sedimentarias, cuya edad varía del Cretácico al Reciente. A continuación, se describen las unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO

Cretácico no diferenciado

Existe solamente un afloramiento muy pequeño de caliza marina en el área, que se localiza 14.5 km al sureste de Calpulalpan, sobre la carretera hacia Apizaco. Consiste de calizas de color gris claro a blanco, con textura sacaroide y bien estratificada.

Estas calizas subyacen discordantemente a un conglomerado de 12 m de espesor, compuesto por fragmentos redondeados de caliza de 1 a 5 cm de diámetro, cementados por material calcáreo que intemperiza a un color gris claro o crema.

TERCIARIO

Andesita El Peñón

Nombre propuesto por Ledezma G.O. (1987), para designar a una secuencia de derrames y tobas de composición andesítica-dacítica. Se caracteriza por formar estructuras montañosas que alcanzan elevaciones de más de 3,000 msnm y acantilados de más de 100 m de altura.

Sus afloramientos más importantes se encuentran alineados, siguiendo una dirección de noroeste a sureste, desde el poblado Atotonilco, ubicado al oriente de Tlaxco, hasta el sureste del municipio de Chignahuapan, en el estado de Puebla.

El más grande de ellos, es el núcleo montañoso que se localiza al oriente y norponiente del municipio de Tlaxco, con un área aproximada de 190 km², que

sobrepasa los 3,000 msnm de altitud y presenta acantilados en su porción superior de más de 100 m de altura.

Se desconoce su espesor total debido a que en sus afloramientos no está expuesta su base; sin embargo, las montañas constituidas por esta unidad muestran espesores que varían de 100 a 700 m, estimados desde la curva del nivel 2,500, que corresponde a la cota promedio de la planicie aluvial.

Rocas Volcánicas del Mioceno Medio y Tardío.

Estas rocas están constituidas por secuencias de toba andesíticas y dacíticas, así como brechas volcánicas, interestratificadas en la parte superior con derrames de lavas.

Terciario no diferenciado

Está compuesto por rocas volcánicas del Plioceno Temprano, que forman un conjunto de afloramientos rocosos, de composición variable, que se observan en la porción suroccidental del acuífero y en el Cerro San Nicolás. Petrográficamente, incluye andesita, latita, riolita y tobas riolíticas, que yacen discordantemente bajo los derrames basálticos del Cuaternario; aún con esta evidencia, no se pudo establecer su posición estratigráfica regional, ya que en ninguno de estos afloramientos se observa el contacto inferior.

Riolita Chignahuapan

Es una secuencia de derrames volcánicos riolíticos asociados a la Caldera Acoculco, descrita de manera informal también por Ledezma G.O. (op.cit.), constituidos por riolitas que afloran en las cercanías de los poblados de Atotonilco, Pueblo Nuevo, Oajala y La Gloria. Su edad corresponde al Plioceno, determinada por su posición estratigráfica sobre el Basalto El Cholón.

Formación Calpulalpan

Conformada por depósitos de pie de monte, constituidos en su base por clásticos andesíticos gruesos, angulosos y subangulosos, del tamaño de arenas, gravas y cantos rodados; mientras que la cima está compuesta por cenizas volcánicas, en las cuales es fácil reconocer algunos horizontes delgados de vidrio volcánico y pómez, que afloran bordeando la base de las estructuras rocosas del Terciario.

También se observan lentes intercalados de depósitos fluviales, que indican la existencia de antiguos cauces de arroyos. Encima de éstos se observa un horizonte de arena de color rosa, seguido por depósitos de clásticos gruesos.

Finalmente, sobre los clásticos gruesos se encuentran horizontes delgados de vidrio volcánico pumicítico y cenizas volcánicas de color amarillento.

Aparentemente, estas cenizas volcánicas cubren los flancos de las sierras cercanas. Los afloramientos de la Formación Calpulalpan se localizan en las laderas del Cerro San Nicolás y en la ladera de la sierra ubicada en el límite noreste del acuífero. El espesor estimado para estos depósitos piroclásticos en la porción meridional no sobrepasa los 300 metros.

CUATERNARIO

Formación El Pino

Corresponde a una secuencia volcánica de composición basáltica-andesítica-traquítica, constituida por derrames lávicos que presentan intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria de caída.

Formación Tláloc

Corresponde a secuencias de depósitos de pómez y bloques, de composición andesítica, latítica y dacítica, intercalados y/o cubiertos por derrames lávicos, que finalizan con efusiones dómicas.

Tobas, cenizas volcánicas y piroclastos andesíticos

Los sedimentos que conforman esta unidad se originaron mediante erupciones efusivas, que fueron depositados en un ambiente lacustre.

Depósitos aluviales

Constituidos por gravas, arenas, limos, cenizas y arcillas producto de la erosión, intemperismo y la alteración de las rocas circundantes que se han disgregado en clásticos, acarreados y depositados por los escurrimientos, así como gran cantidad de depósitos piroclásticos que provienen de los aparatos volcánicos; que se depositaron en los valles, planicies y en los cauces de los ríos y arroyos.

Incluye clásticos gruesos a finos de rocas volcánicas, lentes delgados de cenizas volcánicas, horizontes de diatomita y caliche, así como lentes y estratos de arcilla.

4.2 Geología Estructural

Las fallas presentes en la zona son activas y de tipo normal e indican que la región ha estado sometida a la acción de un régimen tectónico distensivo, entre las que destaca la falla Chignahuapan con rumbo N60°W.

A nivel local se infiere la presencia de la Falla Calpulalpan, que se extiende en toda la porción occidental del acuífero con una dirección SW-NE, desde su límite sur hasta el norte del Cerro El Toronjil el cual se localiza al norte de la ciudad de Apan, Hidalgo.

La falla atraviesa la región por el sur de la ciudad de Calpulalpan y cruza los cerros de Zotoluca, también conocido como El Águila, Cerro Tompeatillo, el Cerro Chulco y el Cerro Jazmín. Otra falla es la conocida con el nombre Tlazala-San Lorenzo, que se presenta en la porción sur del acuífero y cruza los cerros de Tlazala, San Nicolás y San Lorenzo.

Se observa una serie de volcanes en forma de conos cineríticos, tales como el Cerro de Enmedio, el Paraíso, San Vicente y Yehualica en la porción poniente del acuífero, mientras que en la porción sur se presentan los volcanes El Borracho, Las Águilas, Los Laras y El Ocelotzi; y al poniente destacan los volcanes Tezoyo, Colorado, Soltepec y Rosario Viejo.

La tectónica permite sugerir que las rocas más antiguas de la región son producto de vulcanismo submarino asociado al desarrollo de un arco de islas que probablemente inició a finales del Jurásico y continuó hasta el Cretácico Inferior, relacionado con la margen activa del Océano Pacífico.

El periodo Albiano-Cenomaniano se caracterizó por la estabilidad tectónica, que favoreció la precipitación de carbonatos y permitió el desarrollo de las formaciones calcáreas, sedimentación que culmina con un cambio a terrígenos de la Formación Soyatal-Mezcala.

A principio del Terciario se interrumpe esta sedimentación debido a la fase tectónica más intensa de la Orogenia Laramide, caracterizada por esfuerzos compresivos; originando una deformación continua que imprime a las rocas cretácicas pliegues y anticlinales.

Casi contemporáneamente al levantamiento empieza a actuar una fase erosiva con sedimentación molásica representada por la Formación Balsas, también contemporáneamente se desarrolla el evento magmático de la Sierra Madre del Sur que puede estar relacionada con la migración de arcos magmáticos que se distribuyeron a lo largo de la costa del Pacífico (Moran Z. D. et al., 2000), evidenciado por intrusiones graníticas-granodioríticas (Granito Piedras Blancas) y vulcanismo andesítico.

Durante el Mioceno Medio se inicia el desarrollo del Eje Neovolcánico como una serie de eventos con características vulcanológicas y estructurales muy particulares cuyas rocas, caracterizadas por la abundancia de andesitas y dacitas, son típicas de una provincia calcoalcalina. El Eje Neovolcánico se originó por un proceso de subducción en el que la placa que se introduce en forma oblicua respecto de la fosa, presenta variantes en sus características como espesor, densidad, edad,

distancia, ángulo de subducción, composición, etc, además de otros eventos que lo afectaron como son:

El choque de la antigua cresta del Pacífico que influyó en la tectónica de la porción occidental de México o como el cambio de la rotación de la Placa de Cocos, la influencia del sistema de fallas Polochic-Motagua y la rotación de la Placa Norteamericana, causas que generan un campo de fuerzas muy particular que permiten el ascenso de magmas a través de superficies de debilidad (Carta Geológico-Minera "Ciudad de México" E13-2, escala 1:250,000. SGM, 2002).

4.3 Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica e hidrogeológica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como en los depósitos vulcanoclásticos que constituyen los cauces de los arroyos y las planicies, los cuales pueden tener algunos cientos de metros de espesor hacia el centro de los valles. Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas extrusivas, integrada por derrames volcánicos, principalmente tobas, andesitas, riolitas y basaltos, así como rocas calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas carbonatadas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias al desaparecer el fracturamiento a profundidad.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas e interestratificadas con depósitos arcillosos. La alternancia de rocas que no presentan fracturamiento con depósitos aluviales, forman acuíferos locales independientes; en las laderas de las sierras se pueden presentar acuíferos colgados en medio el fracturado.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero en general de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento en la región central debido a la presencia de depósitos lacustres; constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y depósitos vulcanoclásticos entremezclados, con nivel profundo de saturación.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas (principalmente tobas, andesitas y riolitas) y sedimentarias marinas (calizas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por depósitos lacustres. Su espesor saturado es hasta de 400 m.

El acuífero Soltepec está constituido por tres unidades hidrogeológicas, la primera y más importante está representada por sedimentos clásticos de alta productividad, la segunda unidad está constituida por rocas volcánicas y calizas con alto grado de fracturamiento y la tercera es una unidad hidrogeológica mixta o interdigitada.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio llevado a cabo en el año 2002, se realizaron 15 pruebas de bombeo de larga duración, en etapa de abatimiento y recuperación, 7 de ellas dentro del acuífero Apan, estado de Hidalgo y 8 en el acuífero Soltepec, en el estado de Tlaxcala, ambos con el mismo origen, constitución y evolución geológica.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad en recuperación que varían de **1.5×10^{-7} a $3.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** y en abatimiento los valores variaron de **5.5×10^{-5} a $58.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **1.0×10^{-9} a $3.25 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (**0.00016 a 0.0281 m/d**) en recuperación, mientras que en abatimiento varían de **6.7×10^{-7} a $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (**0.0582 a 43.1 m/d**).****

Los valores más altos de ambos parámetros corresponden a los sedimentos aluviales de mayor granulometría y a las rocas fracturadas, en tanto que los valores más bajos son representativos de sedimentos de granulometría arcillosa o rocas volcánicas con bajo grado de fracturamiento.

Solo 3 de las pruebas de bombeo contaron con pozo de observación, las cuales se ubican en el acuífero Apan, en los que se obtuvieron valores de coeficiente de almacenamiento que varían de **2.3×10^{-5} a 2.9×10^{-2}** , representativos de los materiales granulares con un alto contenido de arcillas.

Debido a la litología tan variada que conforma el acuífero regional, para fines del balance de aguas subterráneas se asignó un valor de rendimiento específico de **0.05**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se cuenta con información piezométrica el periodo 1985-2014.

Se describen las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático correspondiente al año 2014; sin embargo, para el cambio de almacenamiento se eligió el periodo 2002-2013 debido a que presenta mayor información con la mejor cobertura espacial. Adicionalmente, como el sistema hidrogeológico se extiende a la porción hidalguense, fue necesario recopilar la información piezométrica histórica del acuífero vecino Apan.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad del nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático 2014 muestra que los valores variaban, de manera general, de 40 a 160 m, incrementándose por efecto de la topografía desde el centro del valle y la porción nororiental hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

Las profundidades más someras se presentan en dos zonas: de 40 a 50 m en el extremo sur del acuífero, entre las poblaciones Nanacamilpa, Sanctorum y Francisco I. Madero; y de 55 a 70 m, que se registran en la porción nororiental del acuífero, entre las poblaciones Benito Juárez y Magdalena Soltepec.

Los niveles más profundos, de 140 a 160 m, se midieron en el extremo occidental, en las inmediaciones de Calpulalpan y hacia las faldas de los cerros Yehualica y Tlamacas.

En la zona de explotación agrícola las profundidades varían de 60 a 100 m (figura 3).

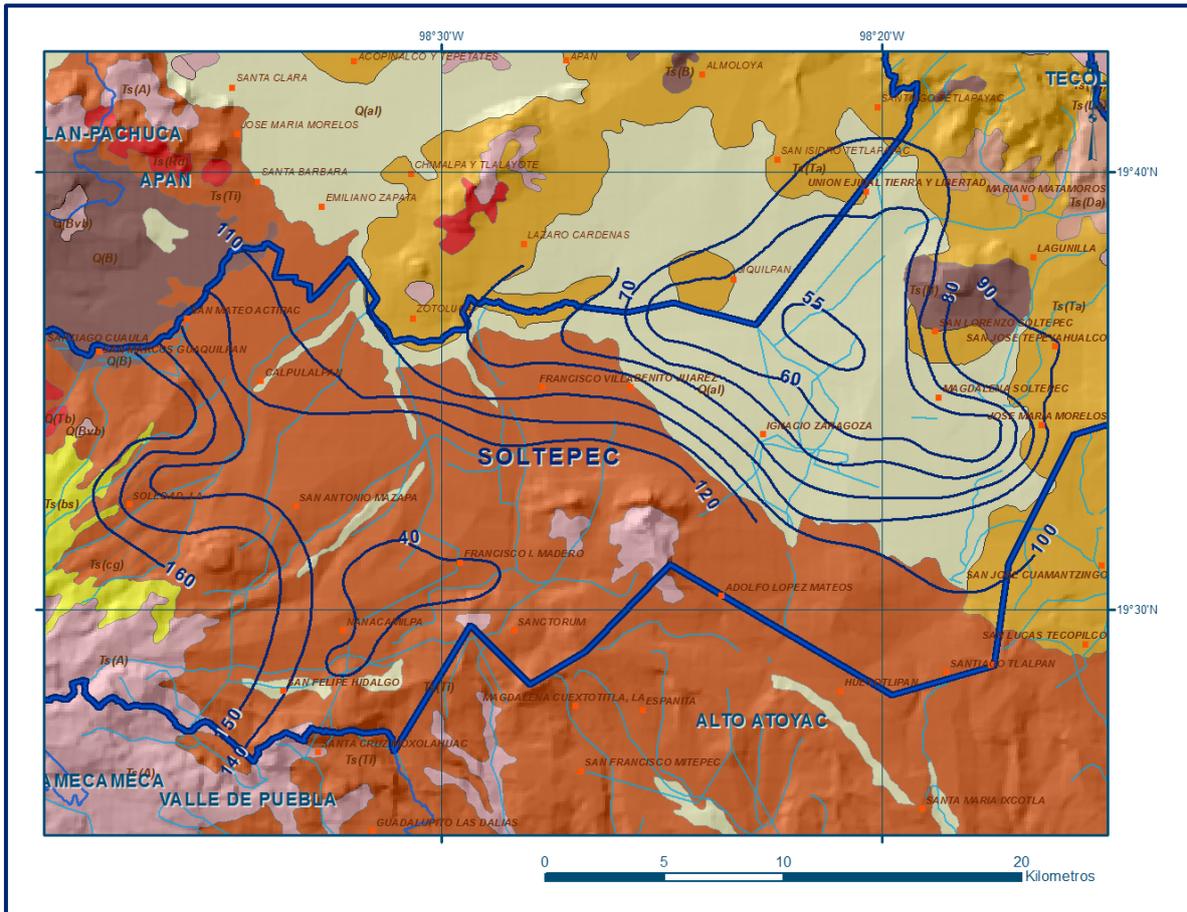


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2014)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2014 se registraron valores que variaron 2700 a 2420 msnm, los cuales se incrementan por efecto de la topografía, al igual que la profundidad, desde la porción central del valle y de la Laguna Atocha, hacia las elevaciones topográficas que delimitan el acuífero y que representan las principales zonas de recarga.

La red de flujo subterráneo muestra una configuración concéntrica hacia la porción central y hacia la Laguna Atocha. En la región central se ha formado un cono de abatimiento, definido por la curva 2440, que se extiende en la principal zona de explotación agrícola, desde Calpulalpan hasta Benito Juárez (figura 4). Sin embargo, la evolución del nivel del agua subterránea en esta misma zona apenas es perceptible, por lo que la depresión piezométrica se debe a la topografía.

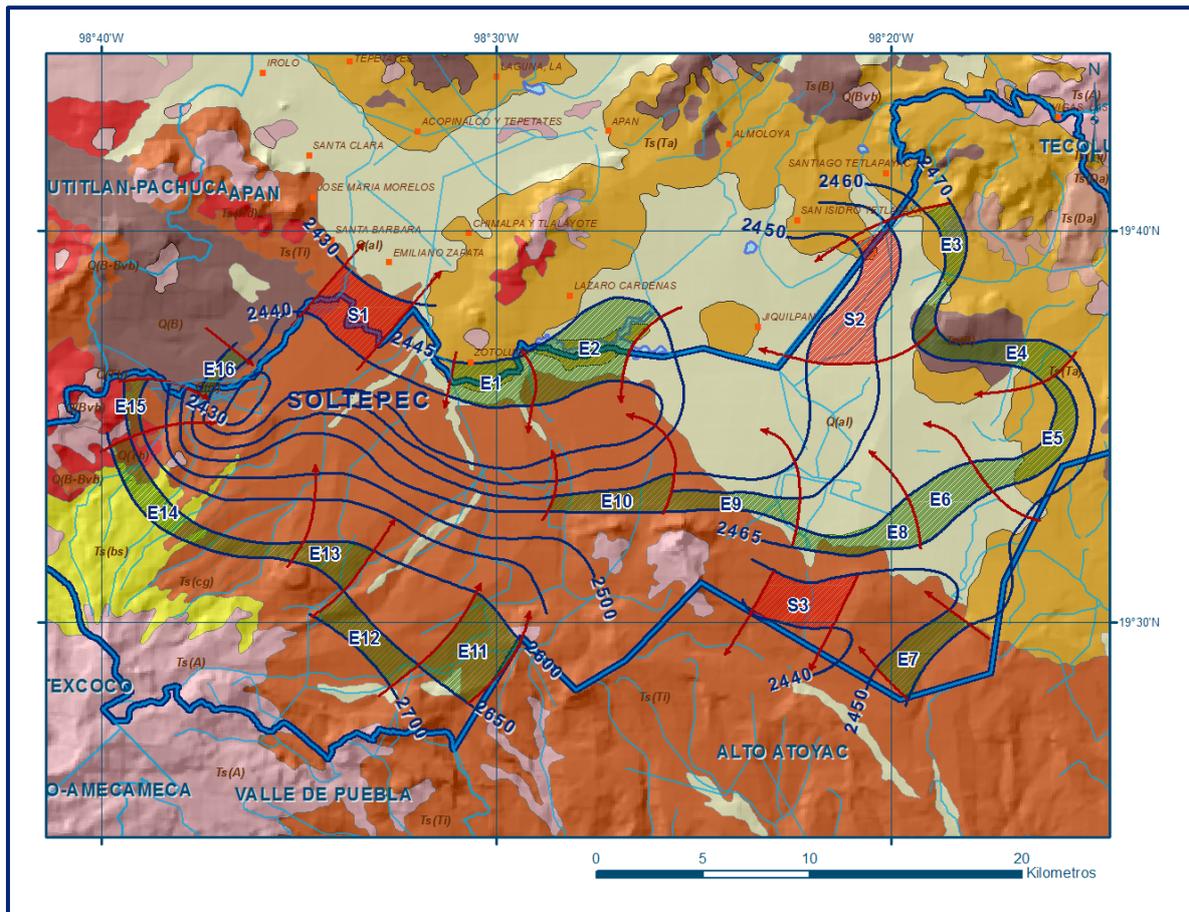


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2014)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2002-2013, registró abatimientos que variaron de 0.5 a 3.0 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.05 a 0.3 m. Los mayores abatimientos, de 2 a 3 m, se registran de manera puntual en dos zonas, una ubicada al suroeste de Nanacamilpa y la otra localizada entre las poblaciones San Lorenzo Soltepec y San José Tepeyahualco.

En la mayor parte del acuífero las variaciones en la posición del nivel del agua no registran cambios significativos durante el periodo analizado (figura 5).

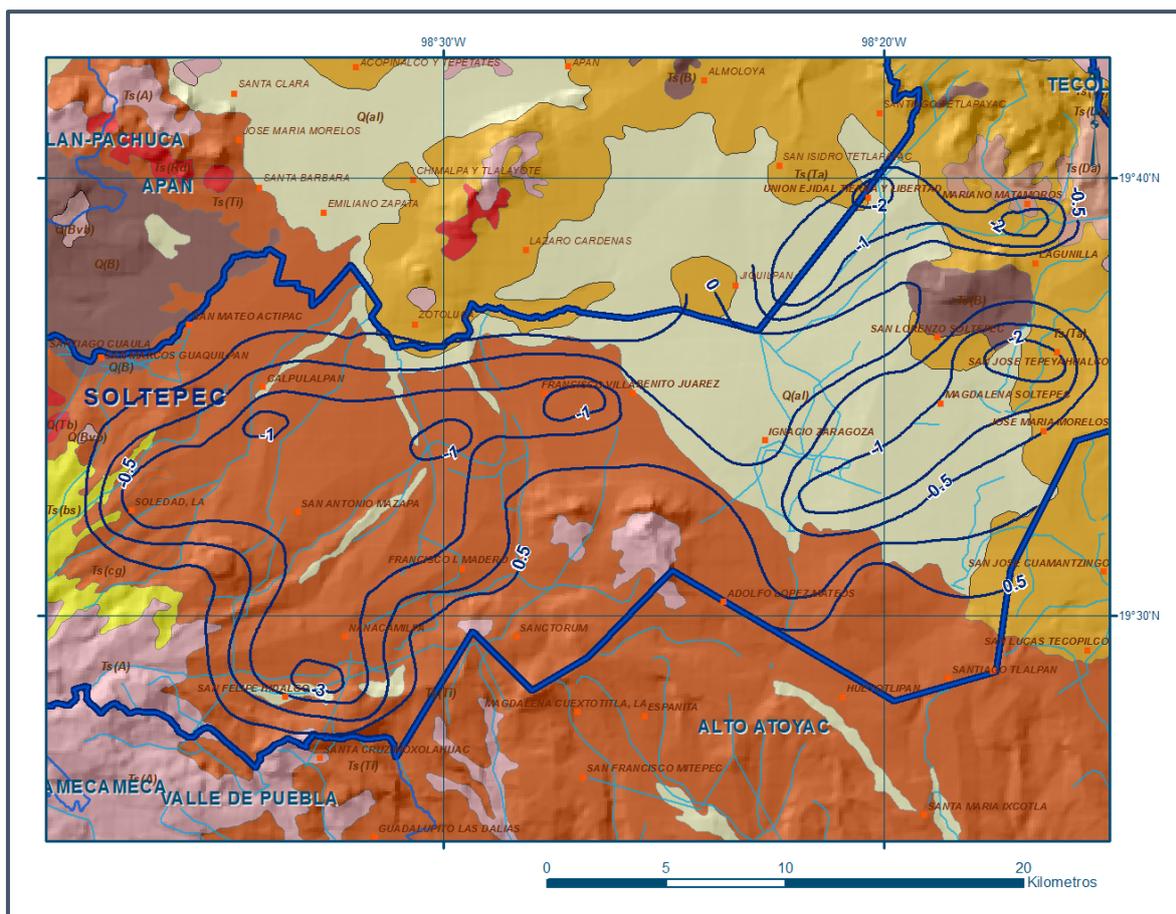


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2002-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2014, se tomaron 10 muestras de agua subterránea en pozos para uso público-urbano distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron 45 parámetros fisicoquímicos y biológicos, entre los que destacan iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, alcalinidad total, dureza total, sólidos totales disueltos, trihalometanos, bencenos, plaguicidas organoclorados, coliformes fecales, fosfatos y nitrógeno amoniacal, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, en todos los aprovechamientos no se sobrepasa el límite de sólidos totales disueltos (STD) que es de 1000 mg/l, establecido por la modificación a la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022., para el agua destinada al consumo humano, ya que su concentración varía de 188 a 592 mg/l.

Las 10 muestras cumplen con los límites máximos permisibles que señala la norma mencionada, tanto en los parámetros químicos, como en los biológicos y físicos. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 247 a 753 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona que rodea a la Laguna Atocha; en tanto que las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

Ambos valores se incrementan gradualmente en la dirección del flujo subterráneo, de manera concéntrica hacia la laguna. La temperatura de las muestras de agua varía de 16.4 a 23 °C y el pH de 7.2 a 8.4.

Por lo que respecta a las familias de aguas, al analizar los resultados con diagramas de Piper, se determinó que todas las muestras analizadas pertenecen a la familia aniónica bicarbonatada, mientras que su fase catiónica corresponde a una mezcla magnésica-sódica, que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las 10 muestras de agua analizadas se clasifican como C_1S_1 , que representa bajo contenido de sales y baja concentración de sodio intercambiable, que las hace aptas para la agricultura sin restricción alguna.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado en 2014, se registraron un total de 164 aprovechamientos ubicados en los límites geográficos del acuífero Soltepec.

De los cuales 106 se encuentran activos y 58 inactivos, 127 son pozos profundos, 24 son norias y 10 son manantiales; además, existe un pozo a cielo abierto, un tajo y una galería filtrante.

De acuerdo con el uso, de los 106 aprovechamientos activos, 41 se destinan al uso agrícola, 13 al uso doméstico, 2 para uso industrial, 1 para uso pecuario, 48 se destinan al abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 1 para servicios.

El volumen estimado de extracción por bombeo es de **17.8 hm³/año**, de los cuales 9.9 hm³/año (55.6%) se utilizan en la agricultura, 6.8 hm³/año (38.2%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 1.1 hm³/año (6.2%) son para usos doméstico, industrial y servicios.

Adicionalmente, a través de los **10 manantiales** se descarga caudal de 28 lps, que equivalen a un volumen de **0.9 hm³ anuales**, 0.8 hm³ para uso público-urbano y 0.1 hm³ para uso doméstico-abrevadero.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Como los niveles del agua subterránea no muestran cambios en 2013 y 2014, debido a que para el año 2013 se tiene mayor apoyo piezométrico.

El cambio de almacenamiento del balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2002-2013, en una superficie de **470 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente:

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero.

Las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y la infiltración de las fugas en los sistemas de distribución de agua potable y de la red de alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero; estos volúmenes se agrupan en la variable denominada recarga incidental (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + R_i + E_h - B - D_m - S_h = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v : Recarga vertical

R_i : Recarga incidental

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal

D_m : Descarga a través de manantiales

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_h + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

7.1.2 Entrada por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Las entradas al acuífero, tienen su origen en la zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle. Para el cálculo de entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2014, mostrada en la figura 4. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal " Q " en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

Q = Gasto

T = Transmisividad

B = Longitud de la celda

i = Gradiente hidráulico

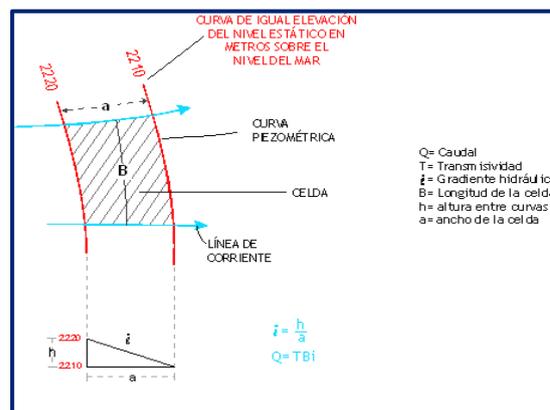


Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	3865	2800	5	0.00179	0.0020	0.0138	0.4
E2	4545	3070	5	0.00163	0.0020	0.0148	0.5
E3	6365	910	10	0.01099	0.0010	0.0699	2.2
E4	6590	1250	10	0.00800	0.0010	0.0527	1.7
E5	7160	1135	5	0.00441	0.0010	0.0315	1.0
E6	3635	2045	5	0.00244	0.0015	0.0133	0.4
E7	4545	1475	20	0.01356	0.0015	0.0924	2.9
E8	5680	1365	5	0.00366	0.0005	0.0104	0.3
E9	5910	795	5	0.00629	0.0030	0.1115	3.5
E10	5115	1135	10	0.00881	0.0030	0.1352	4.3
E11	3070	4320	50	0.01157	0.0030	0.1066	3.4
E12	5000	1475	50	0.03390	0.0010	0.1695	5.3
E13	2955	1590	50	0.03145	0.0010	0.0929	2.9
E14	10225	1020	50	0.04902	0.0003	0.1504	4.7
E15	2725	680	50	0.07353	0.0010	0.2004	6.3
E16	2955	570	10	0.01754	0.0010	0.0518	1.6
Total entradas							41.5

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **41.5 hm³/año**.

Los valores de T utilizados corresponden al promedio de los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas tanto en este acuífero como en otros acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

7.1.3 Recarga incidental (R_i)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a los 40 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo.

De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 11.8 hm³ anuales, de los cuales 9.9 hm³ son de agua subterránea y 1.9 hm³ de agua superficial, el retorno agrícola es de 1.2 hm³ anuales. Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varía según la zona, para este caso se consideró que el 20 % del volumen destinado al uso público-urbano se convierte en recarga incidental.

De esta manera, tomando en cuenta que el volumen destinado a este uso es de 7.6 hm³ anuales, de los cuales 6.8 hm³ provienen de agua subterránea y 0.8 hm³ de agua de los manantiales, la recarga incidental es de 1.5 hm³/año. Por lo tanto, $R_i = 1.2 + 1.5 = 2.7$. **$R_i = 2.7 \text{ hm}^3/\text{año}$.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) y través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **17.8 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2014, mostrada en la figura 4.

En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **39.0 hm³/año**.

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3520	3070	10	0.00326	0.0350	0.4013	12.7
S2	6135	2160	5	0.00231	0.0400	0.5681	17.9
S3	3635	2045	10	0.00489	0.0150	0.2666	8.4
Total salidas							39.0

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2014)

7.3 Descarga de manantiales (Dm)

El caudal conjunto que descargan los manantiales es de 28 lps, que representan un volumen anual de 0.9 hm³. **Dm = 0.9 hm³/año.**

7.4 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2002-2013 (figura 5).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.05, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

- ΔV(S):** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)
- h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -7.9 hm³, por lo que el promedio anual es de **- 0.7 hm³**

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2002- 2013)

Evolución (m)	Evolución promedio (m)	Área (km ²)	Sy	Δv(s) (hm ³ /año)
-3	-3	0.3	0.05	0.0
-2	-2	6.8	0.05	-0.7
-2 a -1	-1.5	41.2	0.05	-3.1
-1	-1	11.8	0.05	-0.6
-1 a -0.5	-0.75	130.6	0.05	-4.9
-0.5	-0.5	0.8	0.05	0.0
-0.5 a 0	-0.25	115.0	0.05	-1.4
0 a 0.5	0.25	101.1	0.05	1.3
0.5	0.5	62.4	0.05	1.6
Área de balance		470.0	TOTAL	-7.9
Promedio anual				-0.7

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = B + Sh + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 17.8 + 39.0 + 0.9 - 0.7 - 41.5 - 2.7$$

$$R_v = 12.8$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 12.8 + 41.5 + 2.7$$

$$R = 57.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
---	------------------------------------	-------------------------------------	--

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 que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **57.0 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **16.2 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

8.3 Volumen de extracción (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 (REPGA), 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 **17,273,231 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual (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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 57.0 - 16.2 - 17.273231 \\ \text{DMA} &= 23.526769 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **23,526,769 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua en 2014. Estudio Geohidrológico del Acuífero Soltepec, en el estado de Tlaxcala. Realizado en 2014 por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1983. Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona de Calpulalpan, Tlaxcala. Realizado por G.C.A