



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SALVATIERRA-ACÁMBARO (1118)
ESTADO DE GUANAJUATO**

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.....	6
3.1 Provincias fisiográficas.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología estructural.....	13
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos.....	14
5.3 Piezometría.....	15
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	18
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	19
7.1 Entradas.....	20
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2 Entrada por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	21
7.1.3 Recarga inducida (Ri).....	22
7.2 Salidas.....	22
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	23
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	23
8. DISPONIBILIDAD.....	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	24
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	25

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 Salvatierra-Acámbaro, definido con la clave 1118 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica al sur del estado de Guanajuato, cubre aproximadamente 748 km² de superficie, abarca gran parte de los territorios de los municipios Salvatierra y Tarimoro; una porción inferior de los municipios Santiago Maravatío y Acámbaro; y una muy pequeña porción de los municipios Cortázar, Jerécuaro, Celaya y Apaseo El Alto (Figura 1).

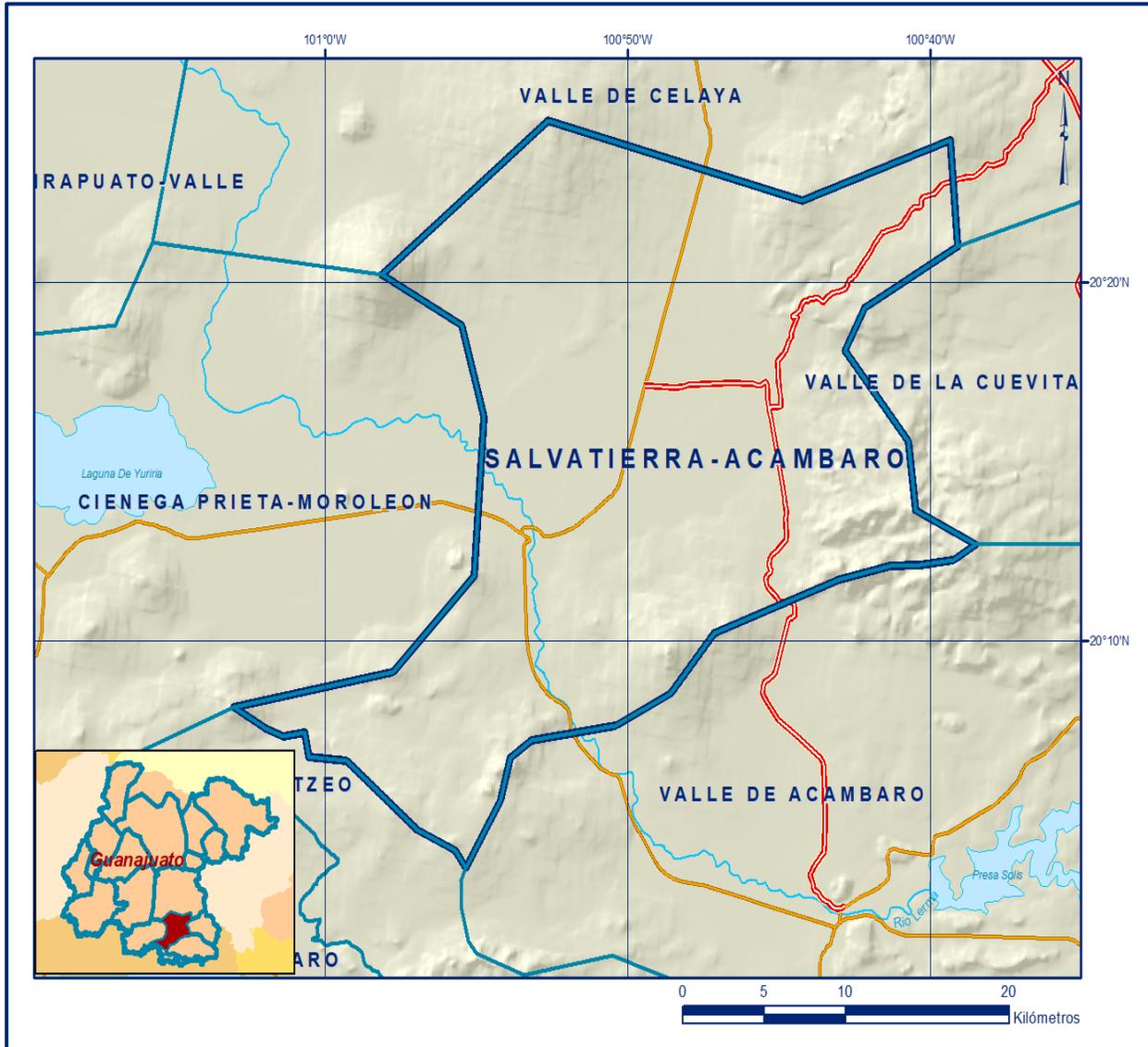


Figura 1. Localización del acuífero

Colinda al norte con el Valle de Celaya, al poniente con el acuífero Ciénega Prieta-Moroleón, al sur con Valle de Acámbaro y Lago de Cuitzeo y al oriente con el acuífero Valle de la Cueva, todos ellos del estado de Guanajuato.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1118 SALVATIERRA-ACAMBARO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	100	55	43.2	20	4	9.9
2	100	56	57.8	20	4	43.2
3	100	59	18.4	20	6	39.2
4	101	0	32.9	20	6	45.1
5	101	0	40.7	20	7	26.5
6	101	1	24.1	20	7	20.6
7	101	1	57.6	20	7	32.4
8	101	3	0.9	20	8	9.2
9	100	57	46.4	20	9	7.6
10	100	55	4.3	20	11	47.0
11	100	54	45.5	20	16	15.4
12	100	55	29.6	20	18	49.4
13	100	58	8.0	20	20	18.8
14	100	52	38.3	20	24	31.9
15	100	44	18.4	20	22	17.5
16	100	39	19.7	20	23	59.3
17	100	39	5.3	20	21	10
18	100	42	10.7	20	19	18.8
19	100	42	48.9	20	18	5.6
20	100	40	44.0	20	15	35.1
21	100	40	28.8	20	13	38.2
22	100	38	30.2	20	12	40.9
23	100	39	14.0	20	12	16.1
24	100	40	20.6	20	12	7.0
25	100	41	20.1	20	12	6.2
26	100	43	0.2	20	11	42.1
27	100	47	9.2	20	10	12.6
28	100	48	35.7	20	8	32.4
29	100	50	24.9	20	7	38.1
30	100	53	11.2	20	7	12.8
31	100	53	52.6	20	6	44.8
32	100	54	13.3	20	5	32.6
33	100	55	21.8	20	3	40.0
1	100	55	43.2	20	4	9.9

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Guanajuato. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda, todos de tipo III. 1) Decreto “Diversos Municipios del estado de Guanajuato”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 14 de noviembre de 1983.

(2) “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los municipios de Silao, Irapuato y Salamanca”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de junio de 1957. (3) Una muy pequeña área de la porción norte del acuífero queda comprendida dentro de la superficie cubierta por el decreto de veda “Región del Bajío, Zona Celaya”, que comprende los municipios de Celaya, Juventino Rosas, Apaseo, Comonfort, Cortázar y Apaseo El Alto, del estado de Guanajuato, publicado en el Diario Oficial el 19 de diciembre de 1964.

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

El principal usuario del agua es el agrícola. Dentro de los límites del acuífero se localiza el Distrito de Riego 011 “Alto Río Lerma”.

Y también pertenece al Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Salvatierra-La Cueva, instalado el 7 de enero de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación. Entre ellos podemos mencionar los más relevantes.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO MATEMÁTICO DE LOS ACUÍFEROS DE SALVATIERRA Y LA CUEVITA. 1999. Objetivos planteados: i) Identificar las estructuras geológicas principales que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea, ii) definir en 3-D la superficie potenciométrica del acuífero, iii) determinar las condiciones actuales de explotación del recurso hídrico, iv) delimitar y cuantificar las zonas de recarga y descarga del agua subterránea, v) proponer zonas de protección del agua subterránea, vi) predecir el comportamiento del acuífero a largo plazo en función del régimen de extracción anual, vii) actualizar la ecuación de balance y determinar la disponibilidad adicional de aguas subterráneas, ix) definir la factibilidad de extraer volúmenes adicionales de aguas subterráneas, x) aplicar un modelo de flujo hidrodinámico, xi) caracterizar las condiciones hidrogeoquímicas del acuífero y evaluar los riesgos potenciales de contaminación y xii) proponer políticas y estrategias para administrar los recursos y regular su explotación con el fin de sentar las bases para su reglamentación.

Actividades involucradas: i) Interpretación de fotografías e imágenes de satélite con verificaciones de campo, ii) petrografía de 12 muestras de rocas, iii) elaboración de 11 sondeos transitorios electromagnéticos, 7 en la zona de Salvatierra y 4 en La Cueva, iv) inventario de aprovechamientos hidráulicos e hidrometría, registrándose 517 aprovechamientos en el acuífero de Salvatierra y 97 en La Cueva, los caudales de extracción calculados ascienden a 106 hm³/a en Salvatierra y 8 hm³/a para La Cueva, v) par de recorridos potenciométricos complementados con un historial proporcionado por la CNA, vi) elaboración de 22 pruebas de bombeo, y vii) colección y análisis físico y químico de 30 muestras de aguas subterráneas.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LAGUNA SECA, SAN MIGUEL DE ALLENDE Y SALVATIERRA-ACÁMBARO, EN EL ESTADO DE GUANAJUATO. 2007. REALIZADOS POR EL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, PARA LA CNA. El objetivo general de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos.

Este trabajo constituye la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincias fisiográficas

El área del acuífero según el INEGI (1991), se ubica en la provincia fisiográfica “Eje Neovolcánico”, principalmente dentro de la subprovincia “Sierras y Bajíos Michoacanos”. En menor proporción, una pequeña región pertenece a la subprovincia “Mil Cumbres”.

El “Eje Neovolcánico” está representado por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originado durante eventos relativamente recientes; durante una segunda etapa se alcanzó el desarrollo significativo de sistemas de fallas asociado con manifestaciones volcánicas y fosas tectónicas. Existen estructuras volcánicas de extensión relativamente amplia, como son los cerros Cuevas de Moreno, Los Agustinos, Prieto y Culiacán. El vulcanismo de la región se generó a lo largo de lineamientos de fallas formando las sierras circundantes y creando paisajes de morfologías combinadas y notable singularidad.

La subprovincia “Sierras y Bajíos Michoacanos” alcanza una magnitud significativa en fallamiento, asociado con manifestaciones volcánicas y fosas.

El vulcanismo se desarrolló a lo largo de algunas líneas de fallas, originando como resultado un paisaje de morfologías combinadas que aportan una notable singularidad a la provincia.

La elevación del terreno varía aproximadamente entre 1,740 msnm al poniente del valle, por donde cruza el río Lerma hasta los 1,790 msnm, en los límites con la Sierra de los Agustinos (oriente del valle), donde se interrumpe abruptamente.

Sus porciones norte y sur están delimitadas por estructuras volcánicas del Pleistoceno (cerros Culiacán, La Gavia, Cuevas de Moreno y Tetillas) y del Plioceno, cuyas elevaciones mayores rebasan los 2,500 msnm.

3.2 Clima

De acuerdo con los datos de las estaciones climatológicas Salvatierra y Tarimoro, que se localizan dentro del acuífero, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5.

En general el clima es intermedio en cuanto a temperatura (mesotérmico). Los promedios anuales de temperatura y precipitación son **19° C y 680 mm**, respectivamente; el régimen de lluvias cubre el período de mayo a octubre, concentrándose principalmente entre junio y septiembre. La máxima ocurrencia se registra en el mes de agosto. La época de estiaje ocurre entre los meses de noviembre y abril.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago, en su totalidad en la Cuenca Río Lerma 4, de acuerdo con la publicación de la disponibilidad de aguas superficiales y la ubicación geográfica de las cuencas (DOF 15 de octubre de 2003). La cuenca se origina en la presa Solís, sobre el río Lerma, en la estación hidrométrica Pericos, sobre el Río Laja, terminando en la estación hidrométrica Salamanca, sobre el colector principal del Río Lerma.

Es drenada por el Río Lerma, el cual cruza el Valle de Acámbaro en dirección SE-NW, alimentando a la presa Solís. Posteriormente, cruza la Ciudad de Acámbaro y continúa con la misma dirección hasta la Ciudad de Salvatierra; finalmente, conforma la denominada Bifurcación del Lerma.

3.4 Geomorfología

El acuífero se localiza en una región cuyo relieve define rasgos geomorfológicos diversos, la mayor parte de origen volcánico y de procedencia fluvial y aluvial.

La hipsometría indica que existe un desnivel topográfico de 1,370 m entre la parte más baja del Valle de Salvatierra y la Sierra de Los Agustinos. El relieve de esta porción de El Bajío se caracteriza por presentar geformas especiales producto de los diversos procesos endógenos y exógenos, algunos de los cuales aún prevalecen. Uno de los procesos endógenos más influyente en la conformación del paisaje de la región es el vulcanismo que ha estado presente desde el Paleógeno-Neógeno hasta el Reciente, relacionado estrechamente con eventos tectónicos globales.

También se tiene un relieve volcánico acumulativo relativamente joven (plio-cuaternario) que no presenta efectos importantes de los procesos exógenos. Los ejemplos más evidentes son los derrames y mesas de lavas del sur de Santiago Maravatío, que presentan escasa densidad y profundidad de la disección del terreno y pendientes de $\sim 10^\circ$. En cuanto a los derrames y productos piroclásticos que representan a la Sierra de los Agustinos, se trata de un relieve volcánico-denudatorio con mayor densidad y profundidad de disección.

En cuanto a procesos exógenos, cuyo agente más importante es el agua en sus diferentes manifestaciones (precipitación, escurrimiento y subterránea), es el relieve de tipo acumulativo que se presenta en el valle de Salvatierra con una altitud de 1,740 a 1,800 msnm, donde se han depositado materiales fluviales de granulometría fina como son arenas, limos y arcillas, además de piroclastos.

Esta planicie debe su origen a la tectónica plio-cuaternaria responsable del vulcanismo del Cinturón Volcánico Mexicano.

También se presentan abanicos aluviales cuaternarios, constituidos por material sedimentario que se presenta al pie de las estructuras montañosas en contacto con la planicie de nivel de base.

4. GEOLOGÍA

La región se caracteriza por presentar numerosos aparatos volcánicos de estructuras diversas (conos, maars, derrames, etc.) que en general conservan su estructura original (Figura 2).

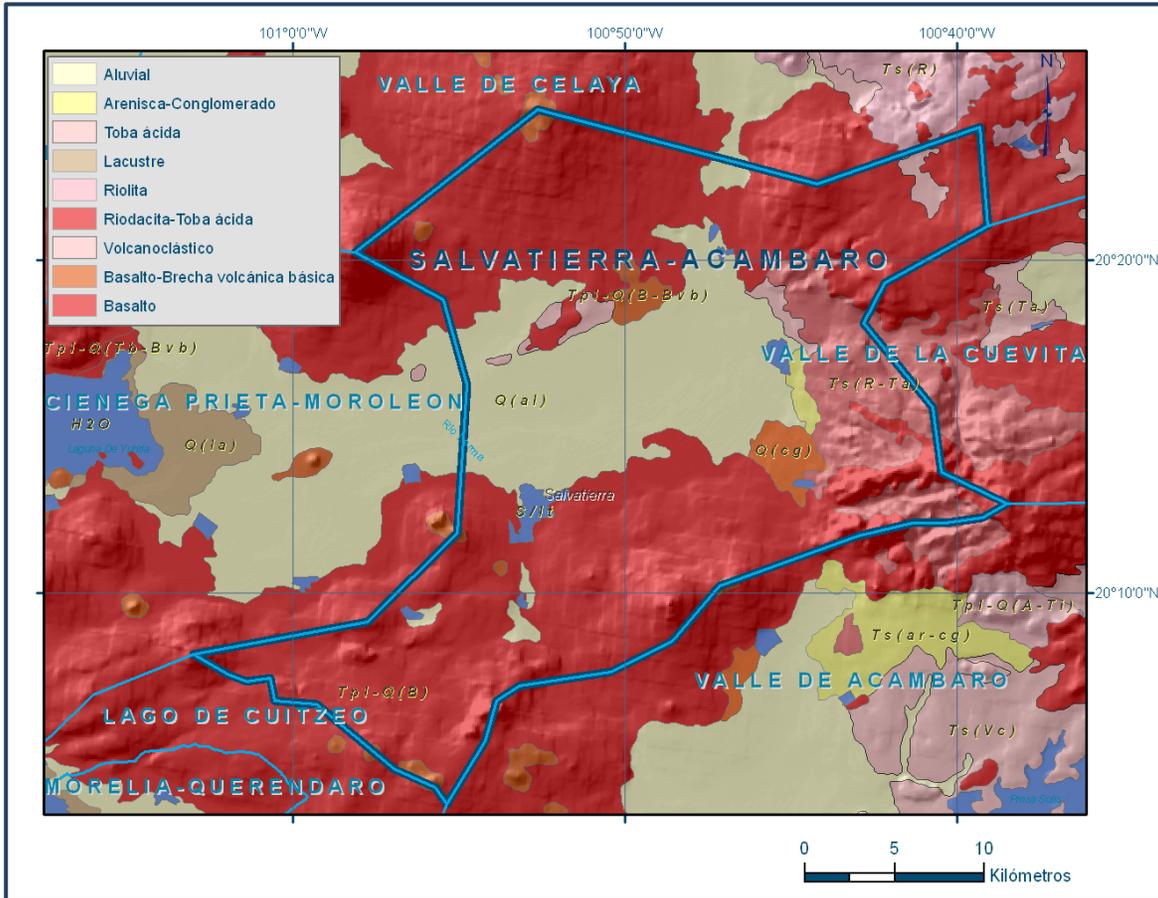


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En el área, el conjunto litoestratigráfico que aflora se conforma de una serie de rocas de litología y edad variables, pertenecientes al Cenozoico. En lo referente a los rasgos estructurales, existe gran cantidad de fracturas y fallas asociadas al vulcanismo del Cenozoico que han dado lugar a fosas y pilares tectónicos, relacionadas con eventos de distensión que son peculiares en esta provincia geológica.

Por debajo de la cubierta volcánica cenozoica se tienen rocas mesozoicas deformadas por esfuerzos compresivos orogénicos, como lo demuestran los afloramientos de rocas en otras localidades cercanas a esta región.

Las rocas que afloran en esta porción de El Bajío se agrupan en diez unidades estratigráficas bien definidas.

Asimismo, se reconoce que existen otras unidades litológicas que no afloran, pero se infiere su presencia en el subsuelo, según información geológica superficial y del subsuelo de localidades cercanas.

A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas.

MESOZOICO

Complejo Vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato (Kcsg). Esta unidad está representada por secuencia de rocas metamórficas, complejos intrusivos, depósitos vulcanosedimentarios marinos y secuencias sedimentarias marinas afectadas por plegamientos, que afloran en algunas porciones de El Bajío como es la Sierra de Guanajuato, debido a procesos tectónicos del Paleógeno-Neógeno. En el caso de la zona del acuífero no aflora, pero es probable su presencia en el subsuelo. Esta unidad es correlacionable con la Formación Esperanza y con la Formación La Luz del Distrito Minero Guanajuato, considerando la primera como la unidad basal (componente sedimentaria) y la segunda como la unidad suprayacente (componente volcánica). Según evidencias paleontológicas a la unidad se le ha asignado una edad de 138 Ma (Valanginiano).

CENOZOICO (Sistema Paleógeno-Neógeno)

Conglomerado Guanajuato (Tcg). Esta unidad no aflora en la zona, pero si en el Distrito Minero de Guanajuato y en gran parte del flanco sur de la Sierra de Guanajuato. Debido a su amplia distribución en El Bajío, tanto en superficie como en el subsuelo, no se descarta su presencia por debajo de la cubierta volcánica cenozoica que cubre buena parte del área del acuífero. Esta unidad consiste de una secuencia clástica continental. Se trata de un conglomerado polimíctico, bien consolidado, dispuesto en estratos gruesos, color rojo y tonalidades verdosas, constituido de clastos de tamaño y origen diverso, empacados en una matriz arenosa, cementada por óxidos de hierro y/o carbonatos. Según relaciones estratigráficas y evidencias paleontológicas, esta formación se originó durante el Eoceno Medio a Tardío.

Andesitas del Oligoceno (ToA). Son las rocas volcánicas paleógenas-neógenas más antiguas que corresponden a una secuencia volcánica constituida por derrames de andesita con intercalaciones de brechas andesíticas, cuya edad se desconoce debido a que no se cuenta con dataciones.

Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad del Oligoceno-Mioceno (?). Aflora al oriente del acuífero, en lo que corresponde a la Sierra de Los Agustinos, específicamente en dos sitios que son: i) Nororiente de Tarimoro, donde se emplaza la Presa El Cubo y ii) Suroriente de El Acebuche, que separa los valles de Salvatierra y Acámbaro.

Andesitas basálticas del Mioceno (TmA-B). Se agrupan con este nombre, a los derrames de andesitas basálticas que afloran al nororiente del acuífero, específicamente entre los poblados de Rincón de Tamayo y La Cueva. Estas rocas deben su origen a los conductos generados por un sistema de fallas que facilitaron su emplazamiento, producto de un evento de distensión ocurrido en el Mioceno Tardío. Con base en sus relaciones estratigráficas se les asigna una edad de 8 Ma.

Riolitas con tobas y brechas riolíticas del Mioceno (TmR-TR). Representan a esta unidad todos los flujos riolíticos con intercalaciones de tobas y brechas riolíticas que se distribuyen en la Sierra de Los Agustinos. Es común apreciar riolitas silicificadas y en algunas partes caolinizadas. En algunos puntos se observa tefra de caída y lava afanítica. Por sus relaciones estratigráficas se le asigna una edad del Mioceno Tardío.

Tobas riolíticas del Plioceno (TplTR). Están representadas por tobas riolíticas con intercalaciones de brechas volcánicas. Esta unidad aflora fuera del acuífero, específicamente al sur de la ciudad de Acámbaro. No se tienen dataciones para esta unidad, pero con base en sus relaciones estratigráficas, se le infiere una edad del correspondiente al Plioceno.

Sedimentos lacustres del Plioceno-Pleistoceno (TplQptla). Con este nombre se hace referencia a todos los sedimentos de granulometría variable producto de la erosión de las estructuras positivas que predominan durante el período Plioceno-Pleistoceno y que se depositan en las zonas topográficamente más bajas. Es así como se inicia el relleno de la fosa Salvatierra Querétaro o de la gran depresión de El Bajío.

Es importante destacar que esta unidad no aflora, pero se reconoce que son todos los sedimentos que actualmente se alojan en el subsuelo del Valle de Salvatierra y que están cubiertos por unidades cuaternarias de piroclastos y aluviones.

Andesitas y basaltos del Plioceno (TplA-B). Esta unidad está constituida por derrames, brechas, tobas y flujos de composición intermedia a básica, que se localizan en la parte meridional del acuífero (al sur de Santiago Maravatío). Con base en relaciones estratigráficas, se ha asignado que corresponde al Plioceno.

Riolitas y tobas riolíticas del Plioceno (TplR-TR). Con este nombre se hace referencia a los derrames riolíticos y tobas riolíticas que afloran al oriente del acuífero (Sierra de Los Agustinos).

Se trata de afloramientos de ignimbritas, domos, brechas volcánicas y tobas. La edad que se le ha asignado a esta unidad, según relaciones estratigráficas, pertenece al Plioceno.

CENOZOICO (Sistema Cuaternario)

Andesitas y basaltos del Pleistoceno (QptA-B). Se refiere a los extensos derrames andesítico-basálticos, ampliamente distribuidas en la zona, que conforman los cerros Cuevas de Moreno y Tetillas, entre otros.

Estos volcanes tienden a alinearse con la traza de las grandes fallas NW-SE del Paleógeno-Neógeno Medio, que fueron reactivadas a fines del Paleógeno-Neógeno. Las características distintivas de estas rocas basálticas, son en sí mismas las estructuras de escudo a partir de las que se formaron.

Están interestratificadas con cenizas volcánicas, tobas y brechas volcánicas, que se alternan entre eventos eruptivos. Se les asigna una edad del Cuaternario.

Piroclastos del Pleistoceno (QptPc). Esta unidad está constituida por piroclásticos producto de los mismos centros de emisión (volcanes monogenéticos) que algunas veces están alineados con los sistemas de fracturas profundas de la corteza. Estas rocas se distribuyen en la porción meridional del acuífero y en las laderas de los cerros Cuevas de Moreno y La Gavia. Por su posición estratigráfica, se les ubica en el Pleistoceno.

Aluvi3n del Holoceno (Qhoal). Son todos los dep3sitos de origen aluvial que rellenan la planicie del Valle de Salvatierra. Cubren discordantemente a sedimentos de unidades anteriores que igualmente son dep3sitos de relleno del valle.

Estos dep3sitos son heterog3neos con variaciones en el tama3o de grano desde arcillas hasta gravas. Por su naturaleza y posici3n estratigráfica, se consideran como la unidad m3s reciente que aflora en el 3rea. Se considera que esta unidad inici3 su dep3sito en el Pleistoceno y contin3a hasta ahora.

Sedimentos lacustres del Holoceno (Qhola). Se denominan as3 a los sedimentos finos (limos y arcillas), que se depositaron en ambiente lacustre, como es el caso de la laguna de Yuriria, que se localiza al occidente del acuífero. Estos sedimentos son de reciente dep3sito (Holoceno).

4.2 Geología estructural

La Orogenia Laramide ocurre durante el Cretácico Tardío y el Paleoceno Temprano, la cual produjo el desarrollo de amplios pliegues horizontales en dirección E-W y una incipiente esquistosidad. Los efectos de esta orogenia son observables en afloramientos de rocas sedimentarias mesozoicas al sureste de San Miguel de Allende, en la Sierra de Pozos y al noreste de Doctor Mora, entre otros lugares más de la Sierra de Guanajuato.

La deformación cenozoica, presenta un régimen tectónico compresivo que prevalece durante el Mesozoico, se transforma a principios del Cenozoico en un régimen de distensión, que dio origen a una provincia tectónica de gran extensión que abarca desde el suroeste de Canadá hasta el centro de México. Su origen se ha atribuido a diferentes mecanismos de carácter tectónico global.

Estos efectos no han sido continuos, sino pulsos o eventos magmáticos de diferente intensidad, provocando diferencias en la densidad, orientación y extensión de las fallas normales y de las fracturas.

Algunos estudios realizados en esta provincia, relativamente cercanos al área del acuífero, se refieren a la existencia de varios eventos en diferentes épocas geológicas.

Los arreglos de los sistemas de fracturas presentan orientaciones diferentes, pero principalmente de rumbos: NE-SW, SSE-NNW y N-S. Estos arreglos pueden relacionarse al relajamiento de los esfuerzos producidos posteriormente a los eventos compresivos que han actuado en la región.

El conjunto de estos arreglos estructurales que datan del Paleógeno-Neógeno y los producidos en el Cuaternario han desplazado el subsuelo en forma de bloques debido a una tectónica asociada a la formación del Cinturón Volcánico Mexicano.

El área ha sido afectada por sistemas de fallas normales de edades distintas, que han dado lugar a fosas tectónicas que alojan sedimentos aluviales y rocas volcánicas. Estas fallas siguen en términos generales dos arreglos: uno con orientación ENE-WSW, y otro que presenta direcciones SSE-NNE.

El primer sistema se asocia al "Sistema de Fallas de la Faja Volcánica Transmexicana" cuya edad se infiere del Mioceno. El otro se relaciona con el "Sistema de Fallamiento Normal de la Región Centro-Occidental de México", sistema que se considera activo.

No obstante, lo anterior, se considera que este segundo sistema actuó en la zona a fines del Neógeno y principios del Cuaternario. Del primer arreglo estructural se deduce la formación de las fosas tectónicas de la región, cuya geometría es fundamental para definir la posición del basamento hidrogeológico del sistema.

Es importante destacar, por un lado, que no se descarta la existencia de fallas sepultadas bajo la cubierta de sedimentos recientes, donde variaciones en la topografía evidencian su presencia y actividad con el hundimiento de las fosas tectónicas al mismo tiempo que ocurre su relleno; y por otro lado, la existencia de fallas de menor extensión, paralelas a las fallas principales.

Estas demuestran nuevamente, que diferentes períodos de actividad han dado origen al desarrollo de bloques inclinados de manera escalonada o de tipo “dominó”.

4.3 Geología del subsuelo

Existe un sistema complejo de fallas y fracturas, lo que ha generado un escalonamiento de bloques que corresponden a fosas y pilares tectónicos, sepultados a diferentes profundidades con la consecuente variación en los espesores de sedimentos de granulometría diversa.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Se definen dos tipos de materiales acuíferos interactuando dentro del contexto de una misma unidad hidrogeológica; una unidad inferior constituida por rocas volcánicas y otra alojada en la parte superior constituida por depósitos granulares de origen aluvial y fluvial.

El basamento se localiza a grandes profundidades, de acuerdo con el sistema de fallas que han dado lugar a las fosas y pilares tectónicos, y está conformado por las rocas del Complejo vulcanosedimentario de la Sierra de Guanajuato y el Conglomerado de Guanajuato.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio que se llevó a cabo durante el 2007, se realizaron e interpretaron 12 ensayos de bombeo y se reinterpretaron 18 más de un estudio anterior. Para la interpretación de las pruebas se utilizaron métodos analíticos convencionales (Cooper-Jacob, Neuman y recuperación de Theis) y un método numérico de dos capas (Rushton and Rathod, 1991).

En la Tabla 3, muestra los resultados de esta interpretación.

Tabla 3. Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo

Pozo de bombeo	Prof. total del pozo (m)	P.N.E. (m)	Transmisividad (T) y Conductividad Hidráulica (K) obtenidas por métodos analíticos						K obtenida por método numérico
			Neuman		Cooper-Jacob		Recuperación de Theis		Rushton
			T	K	T	K	T	K	K
IGC-1	210	20.11	38	0.2	390	2.05	364	1.92	1.4
IGC-16	50	9.38	101	2.49	180	4.43	195	4.8	7
IGC-49	250	27.53	22	0.10	26.5	0.12	20	0.09	1.7
IGC-75	40	6.51	358	10.7	1250	37.32	819	24.5	35
IGC-101	120	3.13	445	3.8	915	7.83	759	6.5	9
IGC-118	150	4.83	26	0.18	53.3	0.37	84	0.58	3
IGC-126	60	5.19	347	6.3	470	8.6	669	12.2	20
IGC-133	100	6.6	445	4.76	736	7.88	887	9.5	9
IGC-184	201	117.42	5.5	0.07	53.2	0.64	25	0.3	0.5
IGC-207	65	28.66	0.9	0.02	384	10.6	399	11	8
IGC-253	180	72.55	24	0.22	170	1.58	150	1.4	2
IGC-424	140	88.08	20	0.39	20.5	0.39	70	1.3	3.5
IGC-479	180	78.18	7	0.07	26.5	0.26	---	---	0.3
IGC-486	200	37.98	73	0.45	168	1.04	75	0.5	1
IGC-519	250	104	110	0.75	564	3.86	---	---	3
IGC-521	270	111.02	65	0.41	533	3.35	80	0.5	4
IGC-543	300	180.65	40	0.34	401	3.36	488	4.1	3.5
IGC-592	350	185.81	14	0.09	164	1.0	180	1.1	0.7
SV-11	200	92.43	93	0.86	503	4.68	---	---	2.8
SV-120	185	92.23	1230	13.26	1670	18.00	---	---	55
SV-137	300	69.33	110	0.48	1150	4.99	---	---	1.3
SV-150	200	93.52	34	0.32	33	0.31	58	0.54	1.4
SV-156	200	106.91	11	0.12	13	0.14	82	0.88	0.6
SV-232	150	81.56	5	0.07	63	0.92	---	---	1
SV-269	150	63.49	11	0.13	16	0.18	42	0.49	0.5
SV-346	250	41.34	---	---	---	---	54	0.26	0.3
SV-366	129	9.15	32	0.27	257	2.14	351	2.93	3.7
SV-374	115	81.36	3800	113	21000	624	---	---	250
SV-376	300	100.07	---	---	5	0.03	1.6	0.01	0.1
SV-384	90	66.88	---	---	159	6.88	53	2.29	7.6

Se puede señalar que los valores de la conductividad hidráulica son muy variables dependiendo del tipo de material geológico, pero se pueden acotar en magnitudes que varían de 0.1 a 10 m/d, excepto algunos cuyos valores oscilan entre 20 y 50 m/d.

5.3 Piezometría

El acuífero cuenta con información piezométrica dispersa en tiempo y espacio. Únicamente la que corresponde al año 1999 y la obtenida en el 2007, cubren en su mayor parte la superficie del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La distribución de la profundidad al nivel estático para el año 2007 se presenta en la Figura 3, en la que se observa que el nivel varía entre 20 y 120 m de profundidad; los niveles más someros se localizan hacia la porción centro-occidental del acuífero, en la zona próxima al Río Lerma; en tanto que los más profundos (>90 m) se ubican al oriente del valle en las proximidades con el poblado de Tarimoro.

En la porción central del valle de Salvatierra el nivel varía entre 20 y 80 m, y al norte del valle, rumbo al poblado de Tamayo, los niveles oscilan entre 80 a 100 m de profundidad.

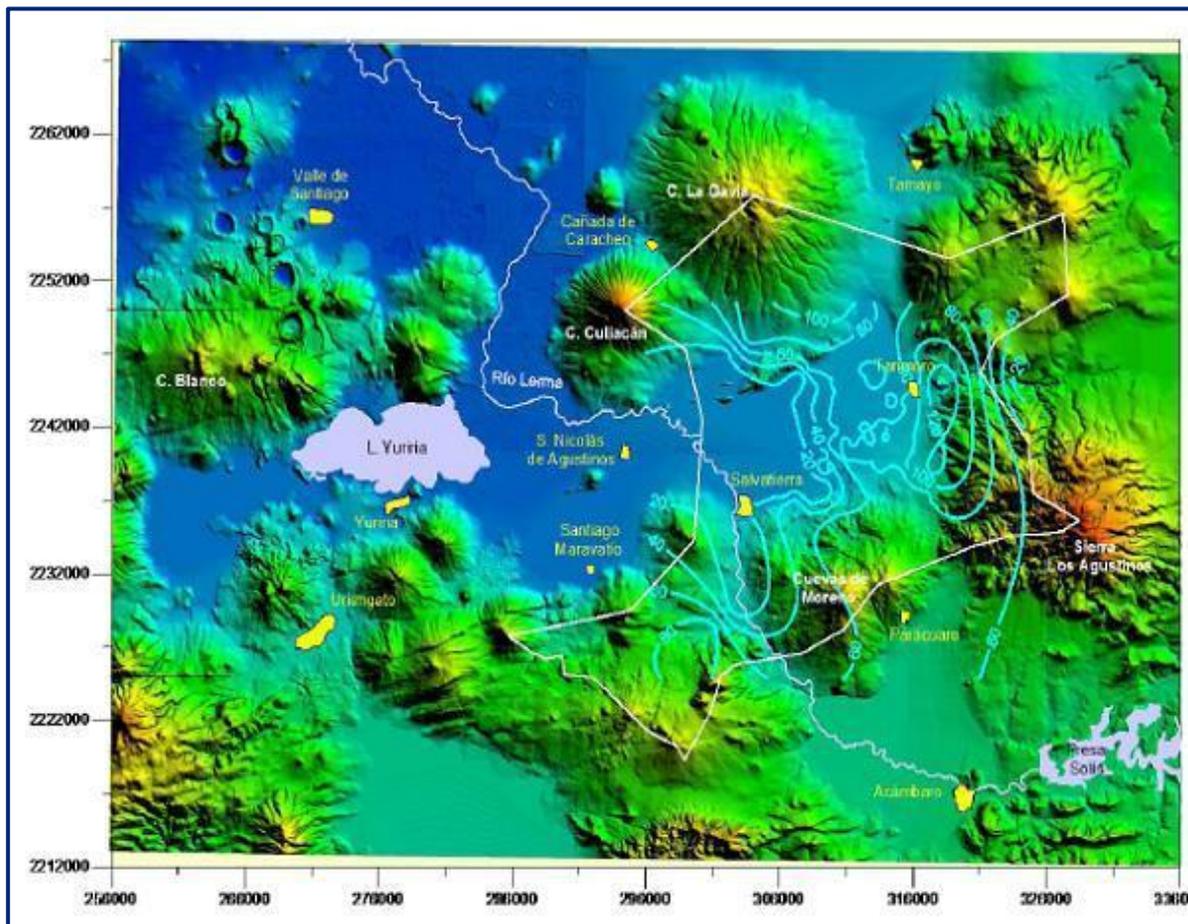


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m, (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En lo que respecta a la configuración de la elevación del nivel estático, los valores varían de 1,740 a 660 msnm (Figura 4) con los valores más altos al occidente del valle y los de menor elevación al oriente (zona del poblado Tarimoro). El flujo subterráneo confluye desde el norte, poniente y sur hacia la frontera oriental del valle, hacia la región que ocupa el pie de la Sierra de Los Agustinos, que también produce aportaciones.

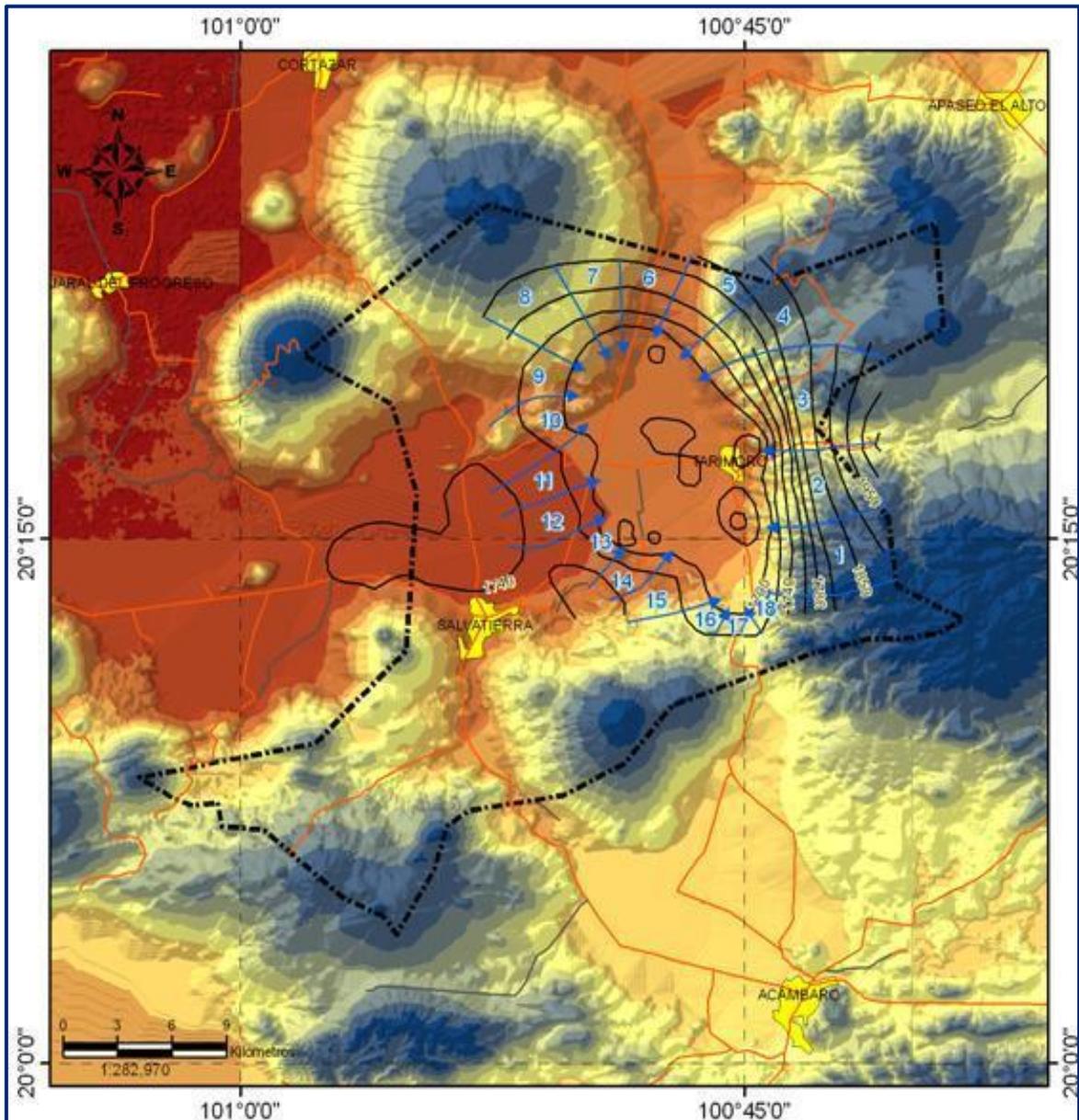


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm, (diciembre 2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para determinar la evolución de niveles del agua subterránea con respecto al tiempo se utilizó información obtenida en 1999 y 2007.

Del análisis de la configuración de la evolución del nivel estático presentada en la figura 5, se puede observar que para este periodo de ocho años se han registrado variaciones negativas de hasta 1 m/año, y hasta los valores cercanos a los 2.5 m/año en regiones de concentración de la extracción.

Los mayores abatimientos se registran en la porción centro-occidente y sur del valle de Salvatierra y en la zona de Tarimoro. En el poblado de Salvatierra no se registran variaciones en la posición del nivel estático.

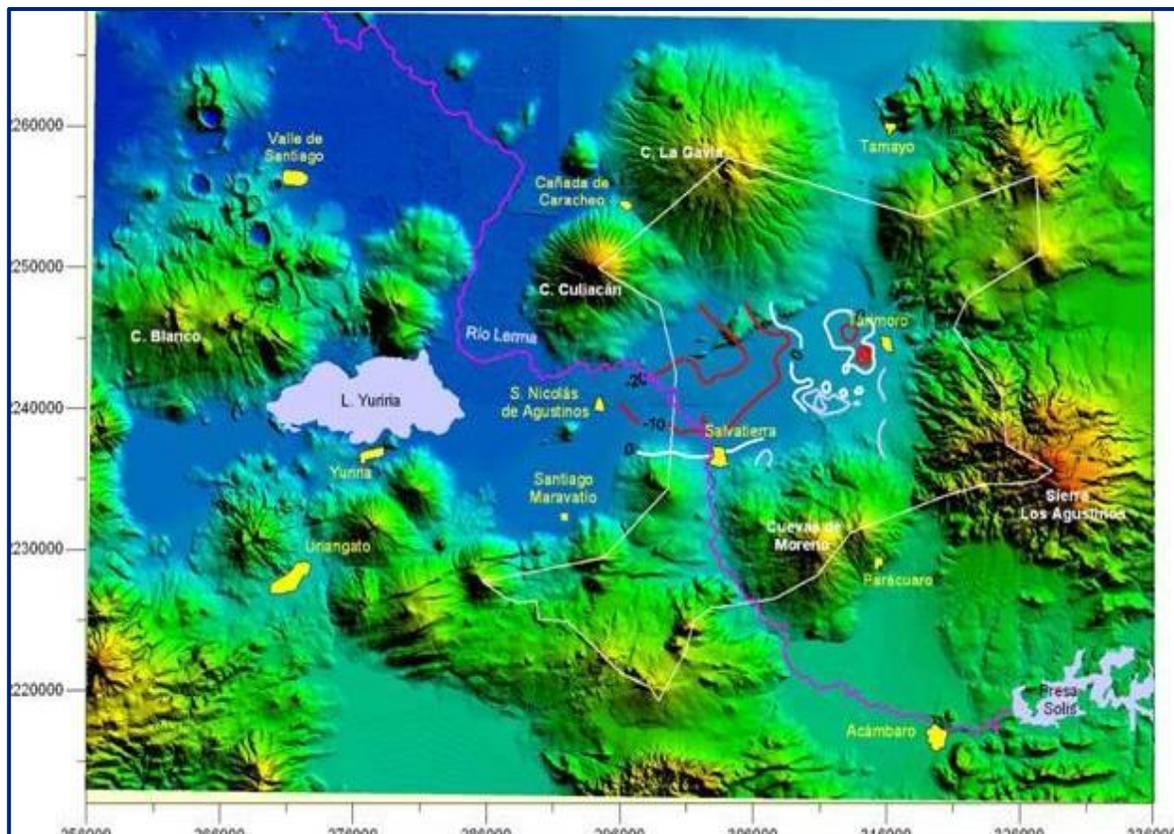


Figura 5. Evolución de nivel estático en m (1999 – 2007)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2007, se tomaron 30 muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de conductividad eléctrica del agua subterránea son variables y en general se asocian a aguas con bajo contenido de sales, poco tiempo de residencia y pequeñas distancias de recorrido en el subsuelo, excepto aquellas con gran conductividad eléctrica y alta temperatura, asociadas probablemente a focos termales muy locales. De manera general, la concentración de sólidos totales disueltos varía de 300 a menos de 1,000 ppm, por lo que se considera apto para el consumo humano.

La mayoría de las muestras de agua pertenecen a la familia sódica mixta bicarbonatada-sulfatada. Se trata de agua blanda en proporción con su contenido de sólidos disueltos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo de aprovechamientos realizado en el 2007, se registraron un total de 389 obras que aprovechan las aguas subterráneas, de los cuales 317 (81.5%) se destinan a uso agrícola, 69 más (17.7%) al uso público urbano y los 3 restantes, (0.8%) para uso doméstico-abrevadero.

De un total de 389 pozos, únicamente el 88% están equipados con bomba de extracción, de los cuales 72.8% son de turbina vertical y 27.2% de tipo sumergible. Del total de obras, 293 se encuentran activos y los 105 restantes inactivos.

La extracción total estimada asciende a **53.0 hm³/año**, de los cuales 46.15 hm³ (87.07%) se destinan a la agricultura, 6.82 hm³ más (12.86%) para uso público urbano y los 0.03 hm³ restantes (0.07%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero y servicios.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 la masa es la siguiente:

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

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:

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

Para este caso particular, se optó por considerar la recarga vertical como incógnita de la ecuación de balance. De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente:

$$R_v + E_h + R_i - B = \pm \Delta V(s)$$

Donde:

R_v= Recarga vertical

E_h= Entrada por flujo subterráneo horizontal

R_i= Recarga inducida

B= Bombeo

ΔV(s)=Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

La recarga total que recibe un acuífero está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, ya que es esta región no existen centros de población tan importantes, que estén ocasionando fugas considerables en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje. De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero Salvatierra-Acámbaro, las entradas están integradas por la recarga vertical (R_v) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene 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:

$$Rv + Eh + Ri - B = \pm \Delta V(S)$$

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = B - \Delta V(S) - Eh - Ri$$

7.1.2 Entrada por flujo subterráneo horizontal (Eh)

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para 2007 (figura 4) y de los valores de conductividad hidráulica obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo efectuadas en pozos distribuidos en la zona, de acuerdo a la siguiente expresión:

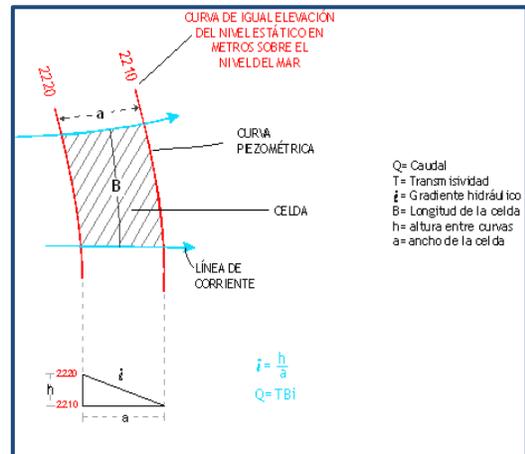
$$Q = K i B$$

Donde:

B = Área perpendicular al flujo subterráneo (m²).

i = Gradiente hidráulico.

K = Conductividad hidráulica (m/d).



La Tabla 4 muestra la estimación de este flujo de entradas subterráneas.

Tabla 4. Cálculo de entradas horizontales por flujo subterráneo

Canal	K	dh	dl	i	a	b	B	KiB
1	0.298	20	1600	0.013	3500	250	875000	3390
2	0.298	20	1100	0.018	3300	250	825000	4425
3	0.298	20	1100	0.018	4000	250	1000000	5364
4	0.298	20	1850	0.011	3100	250	775000	2540
5	0.298	20	950	0.021	3000	250	750000	4694
6	0.298	40	1400	0.029	3000	250	750000	6482
7	0.298	40	1450	0.028	2700	250	675000	5632
8	0.298	40	1800	0.022	3200	250	800000	5245
9	0.298	20	2000	0.01	2350	250	587500	1751
10	0.298	20	900	0.022	2050	250	512500	3360
11	0.298	20	2550	0.008	1650	250	412500	983
12	0.298	20	2750	0.007	2000	250	500000	1043
13	0.298	20	650	0.031	2000	250	500000	4619
14	0.298	20	1250	0.016	1650	250	412500	1967
15	0.298	20	2850	0.007	1700	250	425000	887
16	0.298	20	1350	0.015	1150	250	287500	1285
17	0.298	20	1050	0.019	1400	250	350000	1982
18	0.298	20	900	0.022	1250	250	312500	2049
								21.1 hm ³ /año

Como resultado se obtuvo un valor de **21.1 hm³/año** que representa las entradas por flujo horizontal a la zona de balance de aguas subterráneas.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego.

Para este caso, se aplican a la agricultura de riego aproximadamente 45 hm³/año con aguas subterráneas y 16 hm³/año con aguas superficiales, considerando que el 10% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, los que representa **6.1 hm³/año** de recarga por retornos de riego. Cabe aclarar que lleva implícito una disminución de la recarga debido a procesos de evapotranspiración.

7.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el acuífero Salvatierra-Acámbaro las descargas están representadas únicamente por el bombeo (B). De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático 2007, no existen evidencias de la presencia de salidas subterráneas hacia acuíferos vecinos.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo de aprovechamientos, el volumen de extracción por bombeo es de **53.0 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV)

La evolución piezométrica registrada durante el periodo 1999-2007, muestra que el nivel ha variado sustancialmente en un período de 8 años.

Considerando una superficie de 164 km², en la que se registra un abatimiento promedio de 1.5 m/año, se obtiene un volumen de acuífero 246 hm³, que al multiplicarse por un rendimiento específico del orden de 0.1, se obtiene un cambio de almacenamiento de **-24.6 hm³/año**.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación definida se tiene:

$$\begin{aligned} Rv &= (B) - (Eh + Ri) - \Delta V(s) \\ Rv &= (53.0) - (21.1 + 6.1) - 24.6 \\ Rv &= 1.2 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total es la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= Rv + Eh + Ri \\ R &= 1.2 + 21.1 + 6.1 \\ R &= 28.4 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

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:

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

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 que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso particular, su valor es de **28.4 hm³/año**, de los cuales 22.3 hm³ son recarga natural y los 6.1 hm³ restantes corresponden a la recarga inducida.

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 ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes. Para este caso particular, no existen salidas naturales por lo que se considera que no existen descargas naturales comprometidas.

Por lo tanto, **DNC= 0.0 hm³/año**.

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 (REPD), 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 **56,393,696 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 de 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 28.4 - 0.0 - 56.393696 \\ \text{DMA} &= -27.993696 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es **27,993,696 m³ anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación.

No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor, sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior, para su actualización.