



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE CELAYA (1115), ESTADO  
DE GUANAJUATO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>6</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA .....</b>	<b>7</b>
3.1. Provincias fisiográficas.....	7
3.2. Clima.....	9
3.3. Hidrografía .....	11
3.4. Geomorfología.....	11
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
4.1. Estratigrafía.....	14
4.2. Geología estructural .....	19
4.3. Geología del subsuelo .....	21
<b>5. HIDROGEOLOGÍA .....</b>	<b>24</b>
5.1. Tipo de acuífero .....	24
5.2. Parámetros hidráulicos.....	24
5.3. Piezometría .....	25
5.4. Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1.Profundidad al nivel estático .....	25
5.4.2.Elevación del nivel estático .....	26
5.4.3.Evolución del nivel estático.....	27
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	28
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>29</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>30</b>
7.1. Entradas .....	31
7.1.1.Recarga vertical (Rv).....	31
7.1.2.Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	32
7.1.3.Recarga incidental (Ri) .....	34
7.2. Salidas.....	35
7.2.1.Bombeo (B).....	35
7.2.2.Descarga a través de manantiales (Dm).....	35
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	35
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>36</b>
8.1. Recarga total media anual (R).....	37
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	37
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	37
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	38
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>39</b>

## **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 Valle de Celaya, definido con la clave 1115 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo oriental del estado de Guanajuato, en el límite con el estado de Querétaro, entre los paralelos 20°20' y 20°53' de latitud norte y los meridianos 100°28' y 101°06' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,794 km<sup>2</sup> (Figura 1).

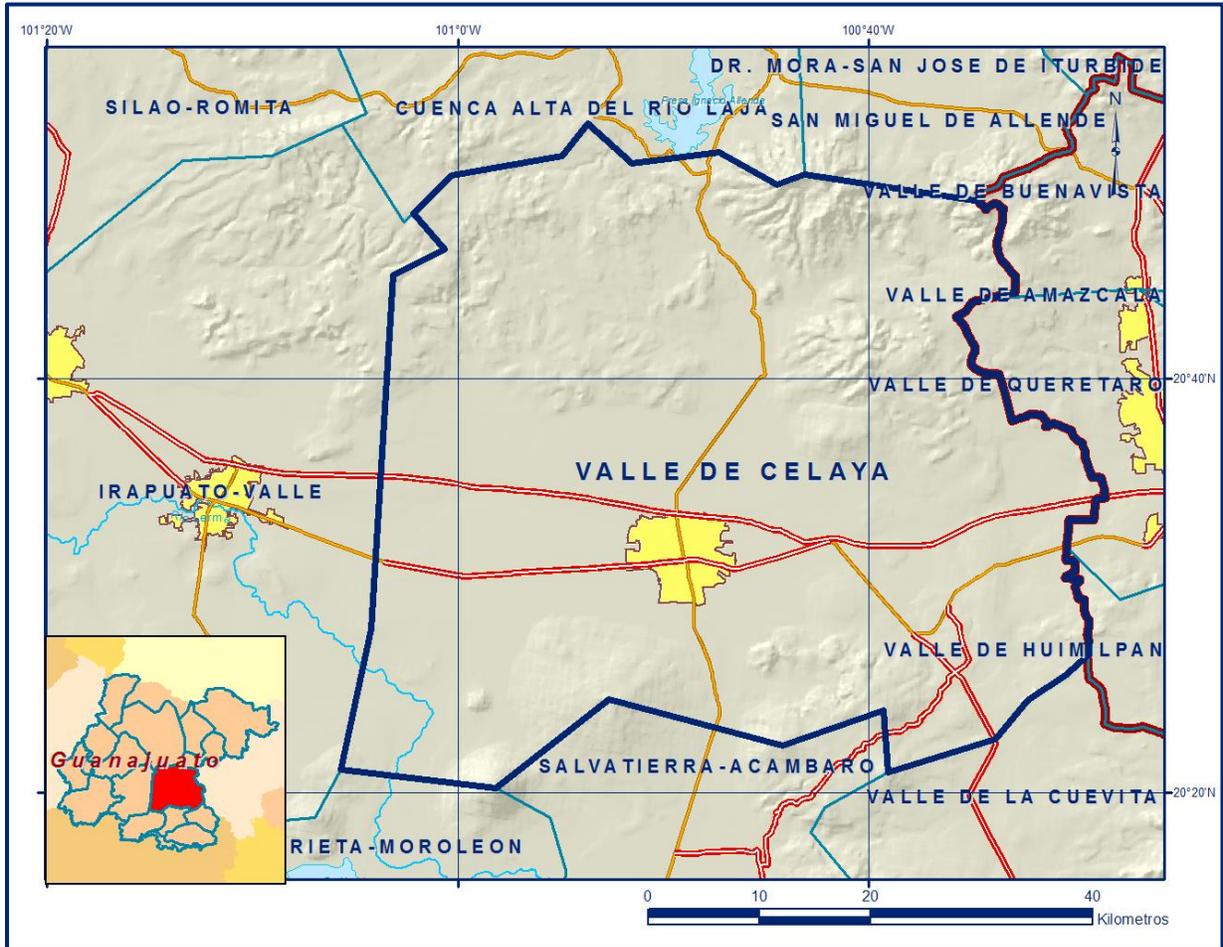


Figura 1. Localización del acuífero

Limita al norte con los acuíferos Cuenca Alta del Río Laja y San Miguel de Allende, pertenecientes al estado de Guanajuato; al noreste con el acuífero Valle de Buenavista; al este con el acuífero Valle de Querétaro; ambos pertenecientes al estado de Querétaro, al sureste con los acuíferos Valle de Huimilpan y Valle de La Cueva, pertenecientes a los estados de Querétaro y Guanajuato, respectivamente; al sur con el acuífero Salvatierra-Acámbaro; al suroeste con el acuífero Ciénega Prieta-Moroleón y al oeste con el acuífero Irapuato-Valle, todos ellos pertenecientes al estado de Guanajuato.

Geopolíticamente, el acuífero cubre la totalidad de los municipios Comonfort y Apaseo El Grande, la mayor parte de Celaya, Villagrán, Santa Cruz de Juventino Rosas, Cortázar y Apaseo El Alto; así como pequeñas porciones de Allende, Salamanca, Jaral del Progreso y Tarímoro.

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 1115 VALLE DE CELAYA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	10	30	27.3	20	25	42.0	
2	10	32	18.5	20	24	28.4	
3	10	33	50.9	20	22	36.8	
4	10	39	5.3	20	21	10	
5	10	39	19.7	20	23	59.3	
6	10	44	18.4	20	22	17.5	
7	10	52	38.3	20	24	31.9	
8	10	58	8.0	20	20	18.8	
9	11	5	42.7	20	21	7.5	
10	11	4	18.8	20	27	54.3	
11	11	3	9.0	20	45	19	
12	11	0	40.0	20	46	15.8	
13	11	2	9.4	20	48	13	
14	11	0	18.1	20	49	49.3	
15	10	54	55.2	20	50	47.9	
16	10	53	40.6	20	52	21.3	
17	10	51	33.4	20	50	24.4	
18	10	47	19.0	20	50	57.5	
19	10	44	29.8	20	49	23.4	
20	10	43	9.2	20	49	52.4	
21	10	34	36.2	20	48	35.6	DEL 21 AL 22 POR EL LIMITE ESTATAL
22	10	34	23.6	20	43	51.2	DEL 22 AL 23 POR EL LIMITE ESTATAL
23	10	30	23.0	20	31	52.4	DEL 23 AL 24 POR EL LIMITE ESTATAL
24	10	29	21.1	20	26	40.0	
1	10	30	27.3	20	25	42.0	

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”, al consejo de Cuenca Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de ocho decretos de veda.

La mayor parte de está sujeta a las disposiciones del “Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región El Bajío, Zona Celaya, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 29 de octubre de 1952; esta veda se clasifica como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. En la porción norte, en pequeñas áreas, rigen tres decretos de veda: el primero de ellos es el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Zona Norte de Guanajuato”, publicado en el DOF el 27 de enero de 1958.

El segundo es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Silao, Irapuato y Salamanca en el Estado de Guanajuato”*, publicado en el DOF el 06 de diciembre 1958.

El tercer decreto rige en muy pequeña área y es el *“Decreto que establece veda, por tiempo indefinido, para la excavación y ampliación de norias y galerías filtrantes y perforación de pozos someros o profundos, en una zona situada al Oriente de la Ciudad de San Miguel de Allende, Gto.”*, publicado en el DOF el 24 de enero de 1949. Estos tres decretos de veda se clasifican como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la región nororiental y oriental rigen dos decretos: *“Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en una zona que comprende cuatro diversos municipios de los Estado de Querétaro y Guanajuato”*, publicado en el DOF el 19 de diciembre de 1964, y el *“Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo, en la zona de los valles de Querétaro y San Juan del Río en el Estado de Querétaro”*, publicado en el DOF el 03 de enero de 1958. Ambos decretos de veda se clasifican como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En el extremo suroccidental, están en vigor dos decretos más: *“Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Silao, Irapuato y Salamanca, en el estado de Guanajuato”*, publicado en el DOF el 15 de junio de 1957, y el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en diversos Municipios del Estado de Guanajuato”*, publicado en el DOF el 14 de noviembre de 1983; ambos se clasifican como tipo II, en los que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

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

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. Dentro de su territorio se localiza el Distrito de Riego 085 “La Begoña” y parte del Distrito de Riego 011 “Alto Río Lerma”. Los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Celaya, A.C., instalado el 28 de noviembre de 1997.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, los más relevantes se describen a continuación:

**SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DEL VALLE DE CELAYA, EN EL ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 1980 por GEOPE S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).** Sus objetivos fueron definir las unidades litológicas que constituyen el subsuelo, sus condiciones geológicas, funcionamiento hidrogeológico y la conexión que existe entre ellas, especialmente con las que contienen aguas termales; todo ello con el propósito de localizar las zonas más favorables para la perforación de pozos de explotación.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO Y MODELO MATEMÁTICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE CELAYA, GTO. Elaborado por Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V., para la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG) en 1999.** Los objetivos principales fueron: determinar las estructuras geológicas que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea, determinar la superficie piezométrica del acuífero, cuantificar y delimitar sus zonas de recarga y descarga, realizar el balance hidrogeológico, representar las condiciones hidrogeológicas del acuífero mediante un modelo matemático, predecir el comportamiento de los niveles del agua subterránea a largo plazo, evaluar el riesgo de contaminación y su impacto ambiental, definir los efectos de la extracción del agua subterránea, proponer políticas y estrategias para administrar el recurso con el propósito de obtener el mayor provecho posible y regular su explotación.

**ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS Y DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE PÉNJAMO-ABASOLO, CELAYA, LEÓN, SILAO-ROMITA, RÍO TURBIO, RÍO LA LAJA, ACÁMBARO Y LAGUNA SECA, EN EL ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 2003 por FYA Consultores, para la Comisión Nacional del Agua.** Su objetivo fue realizar la piezometría en los pozos piloto que definen la red de monitoreo de cantidad y calidad del agua, cuya información permitió elaborar las configuraciones del nivel estático; incluyó también la toma de muestras de agua para su correspondiente análisis fisicoquímico.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS ACUÍFEROS, VALLE DE CELAYA, VALLE DE ACÁMBARO Y LAGO DE CUITZEO, EN EL ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 2013 por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, Dirección Local en Guanajuato.** El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, definir el modelo conceptual de funcionamiento, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, nivelación de brocales, interpretación de pruebas de bombeo y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar 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 analizan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincias fisiográficas**

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Raisz (1964), la mayor parte de la superficie de acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica X Eje Neovolcánico, Subprovincia Sierras y Bajíos Michoacanos, la cual se extiende en dirección este-oeste atravesando la República Mexicana. El extremo noroccidental se localiza en la Provincia Fisiográfica IX Mesa Central. El Instituto de Geografía Estadística e Informática (INEGI, 1997), ubica al acuífero en estas dos Provincias Fisiográficas, en las Subprovincias Bajío Guanajuatense, Sierras y Llanuras de Querétaro e Hidalgo y Sierras y Bajíos Michoacanos, pertenecientes a la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, y la Subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, que pertenece a la Provincia Fisiográfica Mesa Central.

El Eje Neovolcánico es una provincia cenozoica de origen volcánico formada en un ambiente tectónico de arco continental (Ortega-Gutiérrez et al., 1992), que se caracteriza por una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica producto de coladas de lava, conos cineríticos, domos de lava, maars, volcanes escudo, volcanes compuestos y calderas, que se emplazaron en episodios sucesivos entre el Mioceno y Cuaternario. Está orientado en dirección este-oeste atravesando la porción central de la República Mexicana.

Uno de los rasgos más característicos es la presencia de una franja de estratovolcanes que se extienden casi en línea recta alrededor del paralelo 19°. Además de estos estratovolcanes y volcanes tipo escudo, esta provincia también incluye sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, así como estructuras de calderas volcánicas. De oeste a este los volcanes más importantes son el volcán de Colima, Iztaccíhuatl, Popocatépetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote y La Malinche.

Las subprovincias se caracterizan por predominio de derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren que representan fosas tectónicas, por lo que también se le conoce con el nombre de Zona de Fosas Tectónicas.

En la Subprovincia Fisiográfica Sierras y Bajíos Michoacanos, se encuentran lagos formados en depresiones tectónicas (grabens), causadas por fallas, así como por el vulcanismo de la región que propició el cierre de cuencas hidrográficas y la acumulación de aguas superficiales que dieron origen a numerosos lagos. Los más sobresalientes corresponden a Chapala, Cuitzeo y Yuriria. También existe en ella un gran número de depresiones con orientación perpendicular al Eje Neovolcánico, es decir norte-sur. En la cercanía de la zona en estudio se encuentran los conos volcánicos conocidos como Cerro de Cuevas de Moreno y Cerro de Los Agustinos.

La Provincia Fisiográfica Mesa Central se caracteriza por presentar terrenos predominantemente planos, entre los que destacan los extensos valles ubicados al oriente de San Luis de La Paz y entre San José Iturbide y Doctor Mora. Sus principales elevaciones están conformadas esencialmente por rocas volcánicas de tipo riolítico, que conforman serranías altas, en forma de mesetas, con elevación media de 2,000 msnm. En la Subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, conocida también informalmente como "Altos de Guanajuato", las llanuras y las mesetas de erosión se ubican en su porción central, representan alrededor de un tercio de su área guanajuatense, y se encuentran casi totalmente rodeadas por las sierras, mesetas lávicas y lomeríos asociados; en ella predominan las laderas de concavidad vertical; las sierras individuales presentan drenaje y cañadas radiales y distintos grados de disección, y las sierras más grandes incluyen un núcleo central escarpado, a veces alargado, y rodeado de laderas cóncavas tendidas.

En ella destaca la Sierra de Guanajuato, con su cumbre más alta que es La Giganta que tiene una altitud de 2,960 msnm; excepto esta prominencia, las altitudes máximas de la sierra varían de 2,380 a 2,870 msnm.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, en el área cubierta por el acuífero predominan los climas templado subhúmedo y semiseco.

Por su cobertura espacial el más importante es el (A)C(w0)(w) que cubre el 35% de las porciones occidental, centro-norte y centro-sur de su territorio, que corresponde a un clima semicálido, subhúmedo, de tipo menos húmedo, con régimen de lluvias de verano y lluvias máximas

Estas se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal es menor de 5%. Presenta una temperatura media anual mayor de 18°C.

En el 33% de las regiones central y oriental del acuífero se presenta el clima semiseco semicálido BS<sub>1</sub>hw(w), con régimen de lluvias en verano, precipitación media anual que varía de 500 a 700 mm, y porcentaje de lluvias invernales menor del 5%. La temperatura media anual oscila entre los 18.0° y los 21.0°C, el mes más frío es enero, con temperaturas medias entre 13.0° y 16.0°C.

El tipo de clima BS<sub>1</sub>kw(w) se presenta al norte y noreste del acuífero, ocupando el 15% de su superficie; corresponde a clima semiárido, templado, con temperatura media anual entre 12 y 18°C. La temperatura del mes más frío oscila entre -3°C y 18° C, mientras que la temperatura del mes más cálido es menor de 22°C.

El clima C(w<sub>1</sub>)(w) ocupa el 7% de la superficie del acuífero, se registra en su extremo suroriental y en una zona localizada al noroeste; corresponde a un clima templado, subhúmedo, con régimen de lluvias de verano y lluvias máximas que se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; el porcentaje de lluvia invernal menor de 5%. Presenta una temperatura media anual varía entre 12° y 18°C.

El clima C(w0)(w) se presenta en pequeñas zonas del sureste del acuífero que representan el 6 % de su superficie; corresponde a clima templado, subhúmedo de tipo menos húmedo, con régimen de lluvias de verano y lluvias máximas que se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; el porcentaje de lluvia invernal menor de 5%. Presenta una temperatura media anual entre 12° y 18°C.

Por último, el clima C(w0) se presenta en el 2 % del extremo noroeste del acuífero. Corresponde a clima templado, subhúmedo, menos húmedo y con régimen de verano y lluvias máximas que se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm. El porcentaje de lluvia invernal oscila entre el 5% y 10.2% y la temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 17 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Ameche, Apaseo El Alto, Apaseo El Grande, Celaya, Cortázar, Dos Arroyos, El Obraje, El Sabinos, El Terrero, La Begoña, Los Razos, Neutla, Pericos, Presa Jalpa, Roque, Santa Rita y Valle de Santiago; con varios periodos de registro, el más amplio comprende 1922-2012 y el más corto 1979-2012. Con estos datos y utilizando el método de polígonos de isoyetas e isotermas, se determinaron los valores de precipitación y temperatura media anual de **598.4 mm/año** y **18.6 °C**, respectivamente.

De igual manera, con respecto a la evaporación potencial media, se obtuvo un valor de **1,830 mm/año**, con el máximo valor medio en el mes de mayo.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia; uno de junio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los sistemas frontales que afectan la región. Julio es el mes más lluvioso y mayo el más seco.

Los valores medios máximos de temperatura se presentan en mayo, con un promedio de 22 °C.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica “La Laja”, en la cuenca Río Lerma-Salamanca, subcuenca Pericos; en ella se localiza el Distrito de Riego No. 085, “La Begoña”, que aprovecha los escurrimientos del Río La Laja, controlados por la presa Ignacio Allende, ubicada fuera del límite del acuífero, en las inmediaciones de San Miguel de Allende.

### **3.4. Geomorfología**

Los rasgos morfológicos de la zona de estudio están relacionados con estructuras volcánicas; los más abundantes son los cerros de forma cómica que están asociados a conos volcánicos que representan antiguos volcanes.

El relieve presenta tres dominios mayores, uno de ellos es una planicie de relleno que contiene sedimentos lacustres y aluviales.

Esta cuenca rellena de depósitos continentales constituye el nivel base de la región durante el Mioceno, ya que contiene rocas volcánicas de esa edad intercaladas con sedimentos lacustres (margas, calizas y pedernales) que atestiguan un paleo-lago que cubría la región norte.

Actualmente esa planicie se encuentra en proceso de erosión, observándose que los arroyos y ríos escurren hacia el sur, constituyendo la cuenca del Río La Laja.

El segundo dominio es una sierra de baja altitud, formada por mesetas volcánicas que presentan desniveles del orden de 300 m con respecto de los valles. Por último, la prominencia topográfica más importante es el volcán San Pedro, que presenta un desnivel de 900 m con respecto del valle

Adicionalmente se presentan estructuras volcánicas extensas y de baja pendiente, originadas por derrames de lava basáltica que fueron emitidas a través de zonas de debilidad orientadas en sentido NE-SW (fallas normales) o bien a través de volcanes de escudo. Otras geoformas típicas de la región son las depresiones topográficas entre las sierras y cerros que alojan lagos.

#### 4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, el acuífero Valle de Celaya se encuentra circunscrito en el límite entre dos provincias fisiográficas que presentan episodios volcánicos característicos (Figura 2).

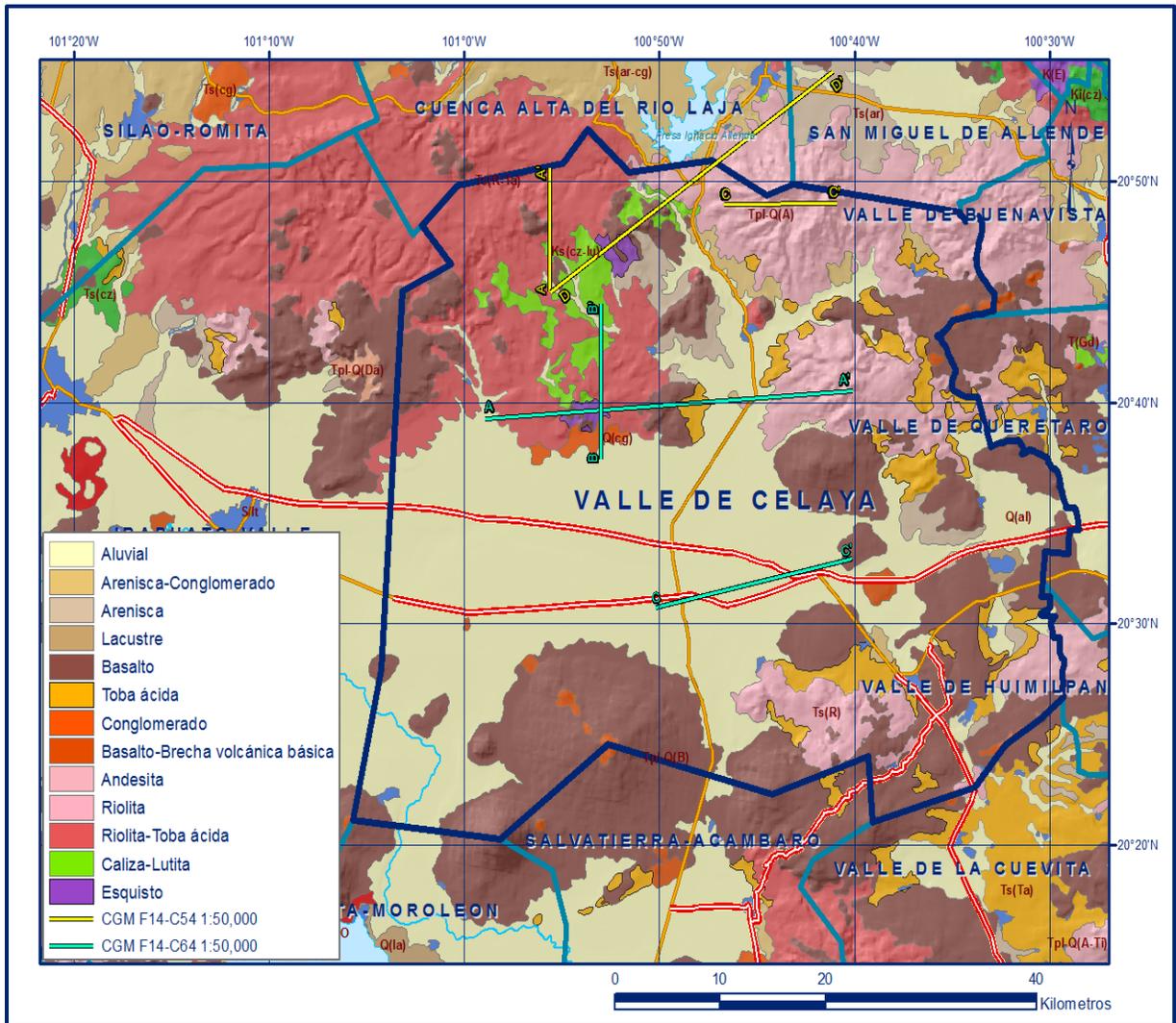


Figura 2. Geología general del acuífero

Por un lado, la Mesa Central dentro de la que se encuentra la Sierra de Guanajuato, que representa un elemento estructural muy importante ya que en ella afloran las rocas más antiguas del estado de Guanajuato; y por otra parte, el Eje Neovolcánico, constituido esencialmente por rocas de composición básica e intermedia, cuya frontera septentrional se encuentra precisamente dentro del sistema-acuífero.

Dicha frontera se manifiesta por un cambio abrupto en el tipo de rocas volcánicas y por la presencia de estructuras regionales que contienen grandes espesores de rocas volcánicas. Esto se refleja, como en la mayor parte del estado de Guanajuato, en el afloramiento de secuencias de rocas ácidas representadas por ignimbritas que se correlacionan con el segundo episodio efusivo de la Sierra Madre Occidental.

En la región en que se ubica el acuífero afloran rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico Temprano al Reciente.

Las rocas mesozoicas son de origen marino y presentan un grado de metamorfismo bajo (facies de esquistos verdes), representadas por filitas y pizarras, meta-basaltos, metatobas de composición básica, calizas y margas, con algunas areniscas metamorfoseadas.

Sobreyaciendo discordantemente sobre las rocas mesozoicas, se observa un conglomerado continental polimíctico de color rojo, de afloramientos restringidos, cuya edad se asigna al Eoceno por correlación con el Conglomerado Rojo de Guanajuato.

Sobre él se observa una cubierta volcánica continental cuyas unidades más antiguas están representadas por tobas, ignimbritas, derrames y domos de composición riolítica y riodacítica, con derrames intercalados de andesita. Sobre estas rocas aflora un paquete de ignimbritas cuya edad se asigna al Mioceno Temprano, que presentan diferentes grados de piroconsolidación, en capas horizontales o con echados muy pequeños.

En la región NW se observa un extenso derrame de riolita, que proviene de un domo riolítico y cubre discordantemente a las ignimbritas. Su edad se ubica en el Mioceno Temprano.

Discordantemente sobre las ignimbritas aflora una serie de rocas volcánicas basálticas y andesíticas, constituida por derrames fisurales y aparatos volcánicos centrales de edad Mioceno Medio. Estos derrames coronan la sierra ubicada en la porción centro-septentrional.

Algunos derrames de basalto e ignimbritas se intercalan con sedimentos lacustres y aluviales que rellenan los valles. Estos sedimentos atestiguan que representan el relleno de cuencas continentales.

Su edad se infiere que abarca del Oligoceno al Pleistoceno ya que se intercalan con ignimbritas de finales del Oligoceno y en las partes superiores se han reportado fósiles del Plioceno y Pleistoceno. Un rasgo importante es que los derrames de basaltos fisurales están afectados por fallamiento.

Por último, en el extremo oriental y nororiental se observan aparatos volcánicos compuestos por rocas basálticas y andesíticas, cuya edad se ubica en el Plioceno.

En la porción central del acuífero se observa una fosa tectónica rellena de sedimentos continentales del Cenozoico y sedimentos pleistocénicos.

Este relleno atestigua una deposición continua desde el Mioceno hasta el Reciente (Carta Geológico-Minera Celaya F14-C64, escala 1: 50,000, SGM, 1999).

#### **4.1. Estratigrafía**

Aunque en la superficie que cubre el acuífero afloran principalmente rocas volcánicas y depósitos sedimentarios cuya edad comprende del Cenozoico (Neógeno) al Reciente, a nivel regional el rango estratigráfico se amplía al Cretácico Inferior y comprende además rocas metamórficas.

A continuación, se describen de manera sencilla las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

### **CRETÁCICO**

#### **Rocas Metamórficas**

Están representadas por rocas de origen marino que muestran un grado bajo de metamorfismo en facies de esquistos verdes, caracterizadas por la presencia de filitas y pizarras, agrupadas en dos conjuntos litológicos: el inferior está formado principalmente por meta areniscas, filitas y algunos pedernales que llegan a constituir radiolaritas; con intercalaciones de derrames de meta-basaltos y meta-tobas de composición básica.

El conjunto superior está conformado por calizas y margas, con algunas areniscas metamorfoseadas. Toda la unidad se observa deformada por acortamiento, presentando cabalgaduras y pliegues; en ocasiones forman pliegues isoclinales. La edad de esta unidad se ubica en el Cretácico Inferior y aflora en la porción norte del acuífero.

### **Formación Soyatal-Mezcala**

Con este nombre se conoce a la secuencia rítmica de calcarenitas, calizas laminares y lutitas con margas, que en localidades del centro y sur de México se han cartografiado por separado, pero que son equivalentes en litología y correlacionables en tiempo.

Aflora en la región nororiental del estado de Guanajuato y su espesor se ha estimado en 800. En la superficie del acuífero aflora de manera aislada en cañadas y pequeños lomeríos ubicados al oriente de Juventino Rosas y al occidente de Comonfort y Escobedo. De acuerdo con su contenido fósil encontrado en la región de Querétaro, se le asigna una edad correspondiente al Cretácico Inferior.

## **CENOZOICO (NEÓGENO)**

### **Rocas volcánicas del Cenozoico Temprano**

Es una secuencia volcánica de composición andesítica a dacítica, que subyace a las secuencias de ignimbritas del Oligoceno-Mioceno en la porción meridional de la Sierra de Codornices. Está compuesta por lavas muy fracturadas y alteradas que presentan matriz afanítica, con escasos cristales de cuarzo y plagioclasa. En muchos afloramientos presenta alteración hidrotermal, que indica la sobreposición de otro evento volcánico posterior. Por sus relaciones estratigráficas, se le asigna una edad del Eoceno a principios del Oligoceno, que puede correlacionarse con la andesita El Cedro (Nieto-Samaniego, *et.al.* 1996).

### **Riolita Chichíndaro**

Se trata de lava porfídica, fluidal, muchas veces en estructuras dómicas, cuya mineralogía incluye fenocristales de feldespatos alcalinos, cuarzo, plagioclasa, biotita y minerales opacos; aflora más allá de la porción suroriental de la Sierra de Guanajuato. Por su edad absoluta, esta unidad también pertenece al Oligoceno, fechada en 32 Ma (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996).

En el área del acuífero sus afloramientos presentan intercalaciones de tobas, brechas y otros productos piroclásticos. Esta unidad cubre a las secuencias ignimbríticas, más alteradas y al parecer más antiguas conocidas en la región con el nombre de Secuencias Ignimbríticas del Oligoceno-Mioceno.

### **Secuencias Ignimbríticas del Oligoceno-Mioceno**

Se denominan así las secuencias ignimbríticas más antiguas del área de estudio, ya que se considera que tiene un origen común.

Están formadas por alternancias de tobas riolíticas e ignimbritas, cuyos centros de emisión provienen del sur en esta región, como lo prueban los afloramientos de esta unidad al sur de Acámbaro, correlacionables con la última fase eruptiva de la Sierra Madre Occidental.

Afloran al norte y este de Juventino Rosas y se distribuyen en el subsuelo de toda el área de estudio, por tanto, subyacen a la unidad de andesitas y basaltos del Mioceno. Se correlaciona con la parte superior de la Ignimbrita Cuatralba, con la Riolita Chichíndaro y con otras ignimbritas del norte del estado de Guanajuato.

Se infiere que, en esta región, a su vez, cubren discordantemente a rocas sedimentarias plegadas y a rocas metamórficas, aunque no se tienen evidencias locales.

Las rocas de esta unidad forman el basamento de las secuencias basálticas del Mioceno Tardío; su edad se determinó por correlación estratigráfica con la parte superior de la Ignimbrita Cuatralba, la Riolita Chichíndaro y otras rocas ignimbríticas del norte del estado de Guanajuato, que se formaron en el período de 32 a 28 Ma; su espesor aproximado es de 800 m.

### **Secuencias basálticas de los volcanes Palo Huérfino y San Pedro**

Se agrupan con este nombre informal, las secuencias volcánicas originadas mediante procesos eruptivos correspondientes a volcanes de escudo y mesetas lávicas. Constituye el edificio principal del Volcán Palo Huérfino formado por derrames de andesita de piroxeno en forma de lenguas con terminaciones lobulares.

El espesor promedio de las coladas es de 20 y 30 m. La secuencia del Volcán San Pedro, es muy similar a la del Volcán Palo Huérfano y son correlacionables de manera general. Se incluyen dentro de esta unidad a las rocas basálticas formadas por vulcanismo fisural, asociado a las fallas con una orientación N-S que afectaron al final del Mioceno las secuencias ignimbríticas; el espesor máximo de estas rocas es de alrededor de 100 m. Esta unidad cubre con discordancia a la secuencia riolítica del Oligoceno Tardío en la porción noreste del acuífero, mientras que en el sur cubre a las secuencias ignimbríticas del Mioceno Tardío. Por sus relaciones estratigráficas y por encontrarse asociada al arreglo de fallas N-S, se le asigna una edad Mioceno-Plioceno.

### **Secuencias Andesíticas del Cenozoico Tardío**

Se agrupan con este nombre las secuencias volcánicas del estratovolcán San Pedro, ubicado en la porción nororiental del acuífero, que forma parte del campo volcánico de San Miguel de Allende. En campo se observaron secuencias de piroclásticos y tobas coronadas por lavas masivas fracturadas de composición andesítica, que en algunas localidades presentan brechas volcánicas y lavas dacíticas con foliación.

Su espesor máximo se infiere en 300 m, de acuerdo con las elevaciones máximas de sus afloramientos y su posible relación en el subsuelo con otras unidades.

Cubren discordantemente a las secuencias ignimbríticas y a su vez descansan debajo de las mesetas de basalto y de los volcanes de escudo, pertenecientes a las secuencias basálticas del Pleistoceno. En algunos sitios subyace también aluvión. Mediante fechamientos isotópicos y relaciones estratigráficas se le asignó una edad similar a la del Volcán Palo Huérfano, del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano.

### **Basaltos del Mioceno Tardío**

Se agrupan con este nombre las rocas basálticas cuyo origen está relacionado a los conductos generados por el fallamiento ocurrido al final del Mioceno, que dieron lugar a la formación del graben de San Miguel de Allende, a la falla El Salitre en la región de los Apaseos (que continúa hasta esta región) y a la prolongación de la falla del Bajío.

Las características distintivas de estas rocas son la presencia de alteración hidrotermal en algunas zonas; su comportamiento como frontera, desde el punto de vista hidrogeológico, y por el relleno de sus vesículas, principalmente de sílice.

Su morfología es característica y su emplazamiento ocurrió a través de fallas profundas asociadas a la distensión del Mioceno Tardío, se estima que su espesor es de 600 m. La edad de estas rocas se asigna con base en su origen y por correlación estratigráfica con los basaltos de Querétaro, que tienen una edad de 8 Ma.

### **Flujos de rocas riolíticas**

Se agrupan en esta unidad a las rocas riolíticas que afloran en la porción suroriental de la región, están formadas por flujos piroclásticos densos, de composición riolítica, alineados a lo largo de la traza de dos estructuras con orientación dominante E-W, en donde se concentran los puntos de efusión en los que se emplazaron domos de vitrificados riolíticos.

En campo se observó una secuencia de rocas ignimbríticas cubriendo a tobas de composición similar. Su espesor máximo de 400 m se infiere con base en su espesor aflorante y sus relaciones estratigráficas.

La edad Plioceno de esta unidad se asignó con base en sus relaciones estratigráficas y geomorfología; sin embargo, otros estudios le asignan una edad correspondiente al Mioceno- Plioceno (10-3 Ma).

### **Derrames andesíticos de fines del Cenozoico**

Denominados Conos de Lava Andesíticos por Pasquare *et.al.* 1991., están constituidos por volcanes lávicos del Plioceno, que afloran de manera aislada en la región sur del estado de Guanajuato. Se les asigna una edad de 2.9-1.0 Ma.

### **Volcanes escudo del Plioceno-Pleistoceno**

Se denomina así a las rocas pertenecientes a los extensos volcanes de escudo que forman las dos estructuras volcánicas amplias de la zona: los volcanes La Gavia y Culiacán, los cuales tienden a alinearse con la traza de las grandes fallas NW-SE del Cenozoico Medio, que fueron reactivadas a fines del Cenozoico. Las características distintivas de estas rocas basálticas son las estructuras de escudo a partir de las que se formaron, interestratificadas con cenizas volcánicas, tobas y brechas volcánicas, que se alternan entre eventos eruptivos y que proporcionan un funcionamiento particular cuando se encuentran saturadas de agua. Con base en fechamientos y datos paleomagnéticos, se les asigna una edad del Plio-Cuaternario (1.3 a 0.83 Ma).

Su espesor de 200 a 600 m se pudo determinar a partir de secciones geológicas y con base en la interpretación de sondeos transitorios electromagnéticos.

## **CUATERNARIO**

### **Volcanes monogenéticos y volcanes escudo del Pleistoceno**

Con este nombre se denomina a las rocas extrusivas monogenéticas existentes en la zona y alineados también con fracturas profundas de la corteza. Estas rocas se distribuyen en la porción meridional del área. Su espesor máximo es del orden de 200 m y en el subsuelo su distribución está restringida a la cercanía de cada volcán. La edad de estas rocas se estima perteneciente al Pleistoceno, durante la última etapa de vulcanismo del Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana.

### **Depósito de pie de monte**

Son los depósitos que se forman al pie de las montañas de algunas sierras; están constituidos por gravas, arenas y arcillas, mal clasificados, que en general presentan una granulometría más gruesa que el aluvión circundante. En realidad, forman parte del aluvión, pero para fines hidrogeológicos es conveniente indicar esta distinción.

### **Depósitos aluviales**

Son todos los depósitos que rellenan el valle de Celaya, formados por los sedimentos depositados por los ríos y arroyos y por el arrastre de detritos de las sierras que lo circundan. Su constitución es heterogénea, con variaciones en el tamaño de grano que varía desde arcilla hasta grava. Por su naturaleza y posición estratigráfica, se consideran la unidad más reciente que aflora en la zona, cuyo depósito inició en el Pleistoceno y continúa actualmente.

## **4.2. Geología estructural**

Desde el punto de vista hidrogeológico, las fracturas son importantes en rocas como las que conforman el relieve de la zona, ya que a través de los arreglos de estas fracturas y fallas de origen tectónico ocurre el flujo subterráneo preferencial en las rocas fracturadas (Larson, 1985).

Las estructuras más notables se atribuyen a un régimen distensivo de esfuerzos, que generó estructuras de fallamiento normal con importantes componentes laterales. De manera general, se han interpretado tres fases de deformación de este tipo en la región.

En términos de la unidad geológica que se explota, el sistema-acuífero presenta variaciones de norte a sur de la secuencia de ignimbritas del Oligoceno-Mioceno al aluvión y basaltos. De este a oeste, los aluviones y coladas de basalto cambian a grandes espesores de basaltos cubiertos por aluvión que aún aporta agua.

El área que cubre el sistema-acuífero ha sido afectada por tres sistemas principales de fallamiento normal de edades distintas, que dieron origen a fosas tectónicas que han sido rellenadas por sedimentos aluviales y volcánicos. Estas fallas siguen, en términos generales, dos arreglos conjugados NE-SW y NW-SE, y otro que presenta una orientación E-W.

El primer sistema se asocia al “Sistema de fallamiento Normal de la Región Centro-Occidental de México” (Ortega *et al.* 1992) cuya edad corresponde al Mioceno. El segundo sistema se relaciona con el “Sistema de Fallas de la Faja Volcánica Transmexicana” (Ortega *et al. op. cit.*), actuó a fines del Cenozoico y principio del Cuaternario y se considera actualmente activo. 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.

Tanto las rocas que afloran como las que le subyacen, según su edad han estado sometidas a diferentes etapas de compresión y/o extensión, creando un modelo tectónico-estructural complejo.

En el caso de las rocas pre-cenozoicas existen evidencias que señalan una etapa de deformación en forma de plegamientos y dislocamientos causados por esfuerzos compresivos de carácter orogénico (deformación mesozoica).

La última de estas fue la Orogenia Laramide que ocurrió al final del Mesozoico. Estas rocas y otras más jóvenes fueron afectadas por esfuerzos distensivos, durante varios eventos ocurridos en el Cenozoico (deformación cenozoica).

La deformación muestra dos eventos tectónicos regionales. El primero corresponde a la fase compresiva de la Orogenia Laramide que deformó las rocas del Cretácico Inferior y produjo un relieve topográfico alto, debido a la yuxtaposición de las secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias.

Los datos estructurales sugieren que la dirección de acortamiento máximo fue NE-SW, con vergencia al NE. Esta fase orogénica ocurrió entre el final del Cretácico y el Paleoceno. El segundo evento es de alargamiento, se manifiesta con fallamiento de tipo normal y tuvo lugar sincrónicamente con una intensa actividad volcánica.

El apilamiento de rocas volcánicas de composición ácida tuvo lugar durante el Oligoceno y Mioceno Temprano, mientras que durante el Mioceno Medio y Plioceno se emplazaron rocas volcánicas básicas. El fallamiento más intenso ocurrió durante el Oligoceno y las fallas generadas durante esa fase fueron reactivadas durante el Mioceno.

En la superficie del acuífero las estructuras principales son la fosa tectónica de Celaya, ubicada dentro de El Bajío y la Falla San Miguel de Allende. La primera es una depresión tectónica que presenta un sistema de fallas normales que continúa hacia el noroeste limitando la Sierra de Guanajuato.

La falla San Miguel forma parte del Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende, fuera del área del acuífero; en San Miguel de Allende, desplaza a los basaltos fisurales del Mioceno Medio y está sepultada por los derrames del Volcán Palo Huérfano (localizado al NE fuera de la zona).

En ese lugar, su desplazamiento vertical fue estimado en 450 m, dando lugar a la formación de una gran cuenca de depósito que se extiende más al norte de Dolores Hidalgo. Dentro del valle de Celaya, forma el límite oriental de El Bajío (Carta Geológico-Minera Celaya F14-C64, escala 1:50000, SGM, 1999).

#### **4.3. Geología del subsuelo**

Con base en información geológica superficial, cortes litológicos de pozos y resultados de la interpretación de sondeos geofísicos, se puede señalar que el agua subterránea se presenta en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo de bloques tectónicos escalonados (horst y grabens) que se formaron en rocas volcánicas y piroclásticas, en el que las fosas o grabens están rellenas de material terrígeno de origen continental, que presenta granulometría y compactación variables, ocasionando heterogeneidad y anisotropía importantes, como lo han demostrado los resultados de conductividad hidráulica obtenidos mediante pruebas de bombeo.

El sistema-acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica y en menor proporción riolítica.

La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor oscila entre algunas decenas de metros hasta varias centenas, de acuerdo con la distribución y forma de las fosas tectónicas que los contienen.

Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor y doble porosidad por su permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea.

Las fronteras son convencionales y están definidas por los parteaguas de las elevaciones topográficas que lo delimitan. Al norte y sur están conformadas por las elevaciones topográficas (volcanes La Gavia, Culiacán y Sierra de Codornices); en tanto que al este y oeste presenta continuidad hidráulica, ya que forma parte de la planicie El Bajío, que se extiende desde el este de Celaya hacia la región de Los Apaseos y hacia el oeste de Villagrán, donde continúa hacia Salamanca.

Con ambas regiones el límite hidráulico se ha establecido mediante parteaguas hidrodinámicos producidos por los conos de abatimiento que separan áreas con diferentes descensos del nivel estático.

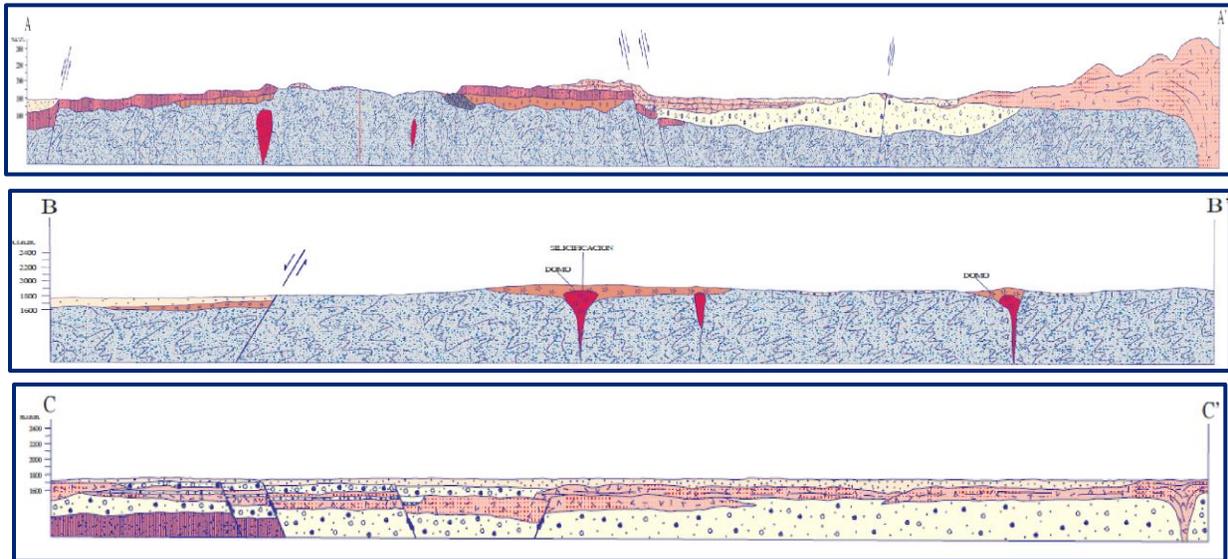
El basamento está representado por las rocas riolíticas, a profundidades por debajo de los 800 m, cuando desaparece el fracturamiento.

A mayor profundidad el basamento hidrogeológico regional está representado por la secuencia de rocas arcillo-calcáreas del Cretácico que constituyen la Formación Soyatal-Mezcala, consistente en una alternancia rítmica de calcarenitas, calizas laminadas y lutitas con margas.

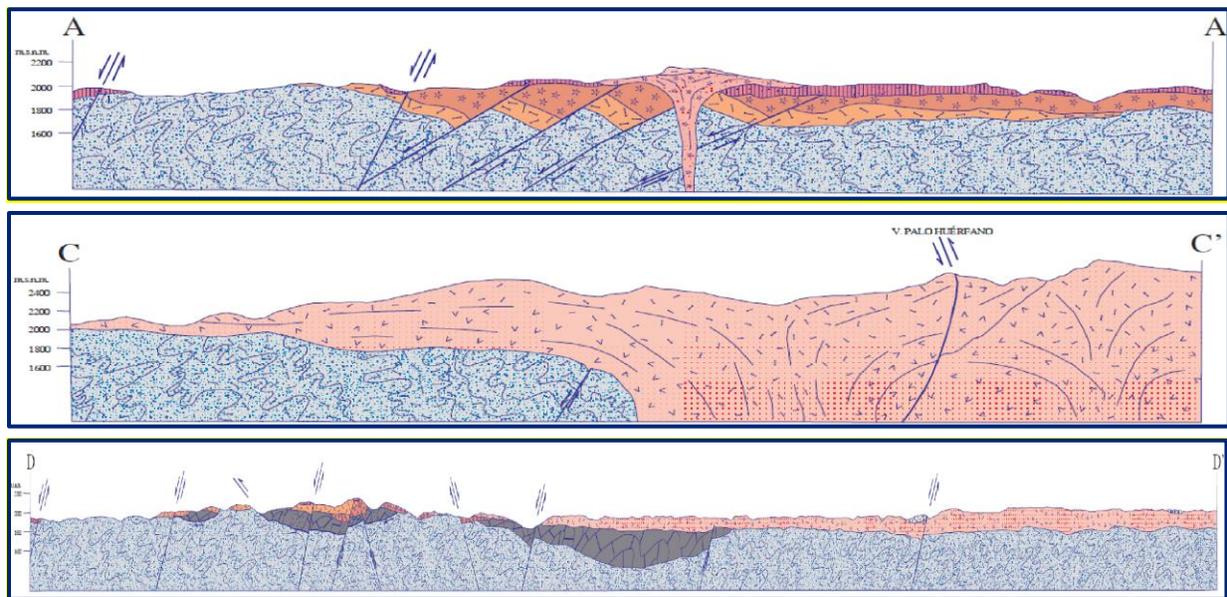
Esta secuencia se presenta a profundidades que varían de 700 a 1,100 m hacia la porción central del valle, dependiendo del control estructural del sistema de horst y grabens.

La disposición de las unidades de interés hidrogeológico en el subsuelo, así como las estructuras que las afectan, ocasionaron su desplazamiento debido a la presencia de la prolongación de la Falla del Bajío.

En las secciones geológicas esquemáticas mostradas en la figura 3, se puede observar que las unidades más importantes en su distribución en el subsuelo son las rocas de composición basáltica de Cenozoico y Cuaternario, así como los depósitos aluviales.



Fuente: Carta Geológico-Minera Celaya F14-C64, escala 1:50000, SGM, 1999



Fuente: Carta Geológico-Minera San Miguel de Allende F14-C54, escala 1:50000, SGM, 1999

Figura 3. Secciones geológicas

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas y geofísicas permiten establecer que la dinámica del agua subterránea se presenta en un sistema-acuífero **libre a semiconfinado**, tipo granular-fracturado-con doble porosidad, heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica regional, entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcano-sedimentarias y depósitos terrígenos de compacidad y granulometría variables. Está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica y en menor proporción riolítica.

La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor alcanza varias decenas de metros, de acuerdo con la distribución y forma de las fosas tectónicas que los contienen. Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea. El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas y pilares tectónicos. El funcionamiento hidrogeológico en la región es muy variado, debido a la heterogeneidad de las diferentes emisiones de basalto y demás derrames volcánicos que afloran y a su grado o intensidad de fracturamiento; por lo anterior, sólo algunos de estos materiales son capaces de constituir buenos acuíferos.

### 5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2013, se realizaron 16 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad en el rango comprendido entre **0.012 y  $17.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en tanto que la conductividad hidráulica presenta valores entre  **$5.63 \times 10^{-8}$  a  $5.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (0.005 y 47.6 m/d)**. Adicionalmente, existe un mayor número de pruebas realizadas en estudios previos. De los resultados de la interpretación de todas ellas por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico de Rathod y Rushton, se establece que los valores de transmisividad varían de **0.05 a  $37.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** .

Los valores más altos se registran en la zona comprendida entre Celaya, Rincón de Tamayo y Cortázar, y los más bajos entre Celaya y Comonfort.

En función de la unidad hidrogeológica que aporta el agua, los valores más bajos de transmisividad se registran, como es de esperar, en la secuencia arcillo-calcárea de la Formación Soyatal-Mezcala y en las ignimbritas y tobas riolíticas compactas, en tanto que los más altos corresponden a las rocas basálticas. Ninguna de las pruebas contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores de coeficiente de almacenamiento. De acuerdo con la litología, se asignó un valor promedio de rendimiento específico de 0.08.

### **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información para los años 1991, 1999, 2007, 2008 y 2009. A partir de 1999 la CEAG realiza mediciones piezométricas semestrales.

Debido a que para los últimos años se cuenta con mayor apoyo piezométrico, con el objetivo de evaluar una condición geohidrológica actual del acuífero, apoyada en la mejor distribución espacial de la información, se elaboraron las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático para el año 2013 y para la evolución el periodo 2009-2011, ya que éste es el que mostró la mejor cobertura espacial.

### **5.4. Comportamiento hidráulico**

#### **5.4.1. Profundidad al nivel estático**

La profundidad al nivel estático para el 2013 presentó valores que variaron de 10 a 200 m, que de manera general se incrementan conforme se asciende topográficamente y solo en la porción urbana de la ciudad de Celaya se modifica esta tendencia por la concentración de la extracción.

Los valores más profundos, de 150 a 200 m, se registran al sur del acuífero, en la zona de Rincón de Tamayo; y de 120 a 170 m en la zona agrícola ubicada al norte de Cortázar. En la zona urbana de Celaya, la profundidad al nivel del agua subterránea varía de 100 a 120 m, así como en las zonas de Juventino Rosas, Cortázar, Apaseo El Grande y Apaseo El Alto.

Los niveles menos profundos, con valores de 10 a 50 m, se ubican al suroeste del acuífero, entre las localidades Jaral del Progreso, Loma Linda y El Colorado, y al norte en la zona de Comonfort (figura 4).

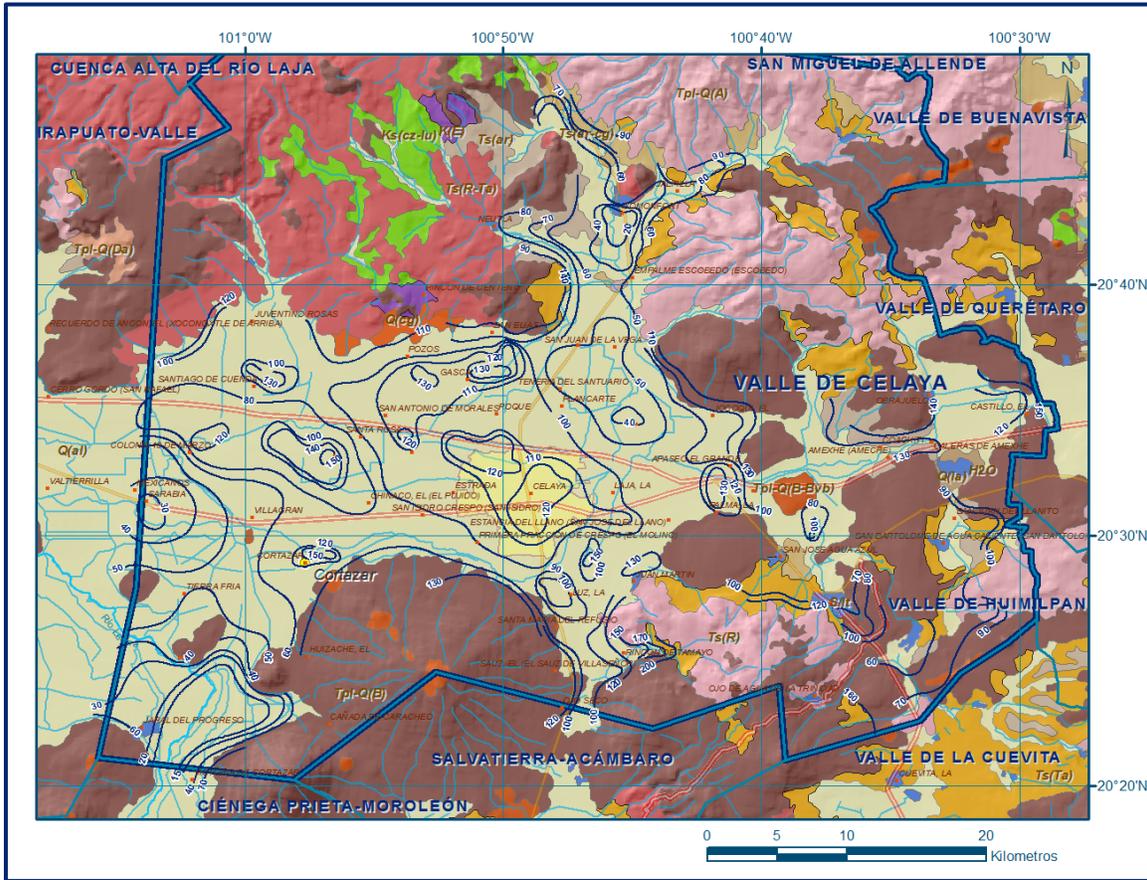


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

En la configuración de elevación del nivel estático para el año 2013, los valores variaron de 1,900 msnm, que se registran en la porción suroriental del acuífero, en la zona ubicada al este de Apaseo El Alto, hasta 1,600 msnm que se observaron al norte de Villagrán. En la porción central y occidental del acuífero se observan dos extensos conos de abatimiento definidos por la cota 1,650 msnm: el más extenso localizado en torno de la ciudad de Celaya, asociado a la extracción para abastecimiento de agua potable, y en el extremo occidental en la zona agrícola localizada al norte de Villagrán y Cortázar, que forma un parteaguas hidrodinámico con el acuífero vecino Irapuato-Valle. En la zona que rodea toda esta porción centro-occidental, la elevación del nivel estático es de 1,700 msnm. De esta manera, se define una red de flujo concéntrica hacia estas dos zonas de concentración de la extracción, alimentada principalmente por los flujos provenientes del sur y norte, donde se ubican las zonas serranas que constituyen las áreas de recarga. En la porción suroriental del acuífero la dirección preferencial del flujo subterráneo es SE-NW (figura 5).

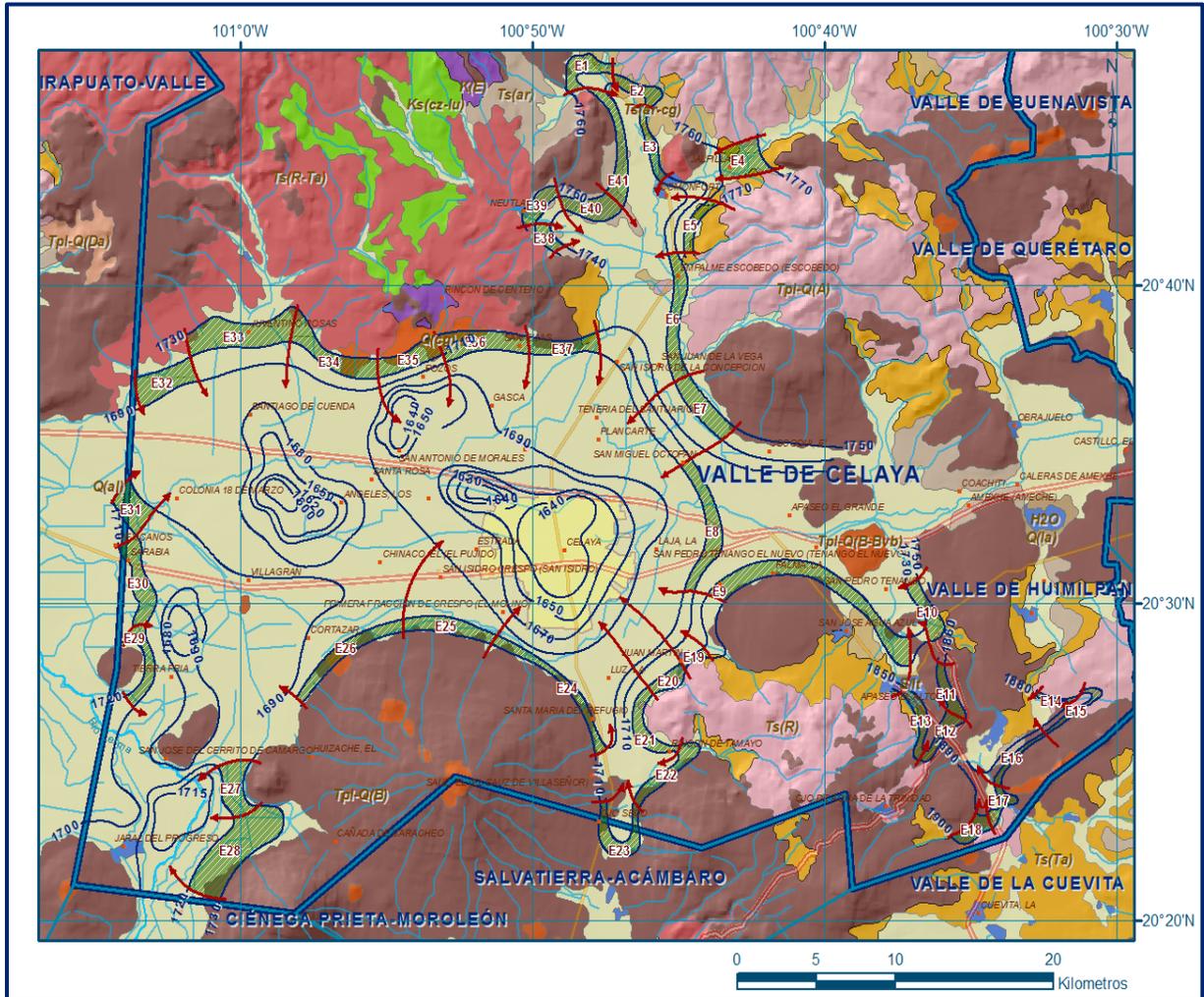


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

De acuerdo con la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2011 los valores de abatimiento variaron de 1.0 a 10.0 m, con un ritmo promedio anual de 3.0 m. Los mayores abatimientos, de 8 a 10 m, se registraron en toda la porción central del valle, en la zona que rodea la ciudad de Celaya, entre ésta y el poblado San Juan de la Vega y en el área de Apaseo El Grande; al occidente, en la zona agrícola localizada al sur de Juventino Rosas y Cortázar; y en la porción sur en la zona agrícola de Rincón de Tamayo.

En la mayor parte de la superficie de explotación el abatimiento está definido por la curva de 6 m, es decir, 3 m anuales. En el área restante de la zona de explotación, se registran valores de abatimiento que varían de 1.0 a 4.0 m para el periodo analizado, que representa un promedio anual de 0.5 a 2.0 m (figura 6).

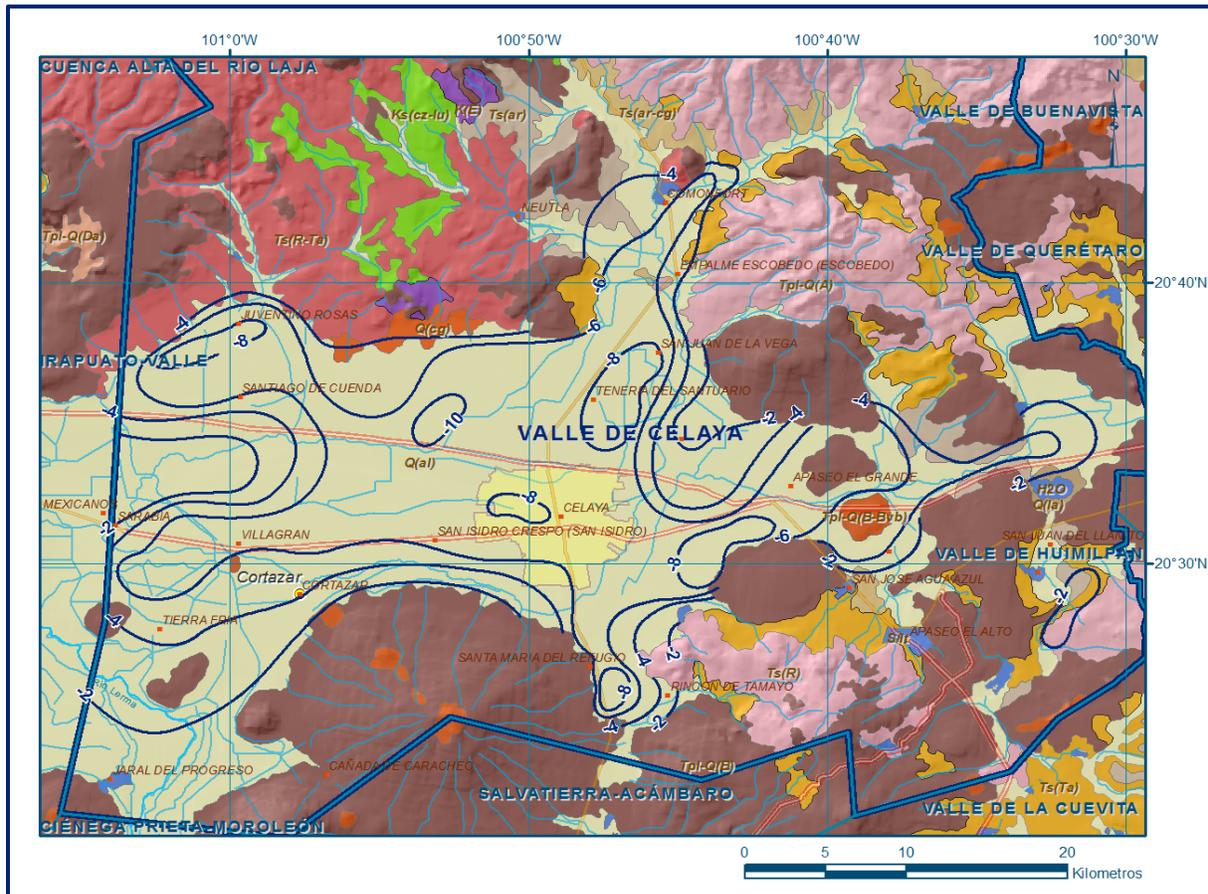


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2011)

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2013, se tomaron 20 muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente (18 pozos y 2 manantiales).

Las determinaciones incluyeron: temperatura, potencial de Hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, iones principales, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana 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, y por lo tanto para otros usos la concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 202 a 770 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido por la norma mencionada para el agua potable.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 448 a 1,711  $\mu\text{S}/\text{cm.}$ , que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de pH varían de 6.25 a 10.61 y de temperatura entre 18.4 y 43.8 °C. En uno de los manantiales el agua registró una temperatura de 55 °C.

La familia de agua predominante es bicarbonatada-sódica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha estado en contacto con rocas volcánicas que contienen plagioclasas sódicas.

La clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para determinar la calidad del agua para uso agrícola, establece que las muestras analizadas se clasifican como  $C_1-S_1$  y  $C_2-S_1$ , que corresponde a salinidad baja a media con bajo contenido de sodio intercambiable, que es adecuada todos los cultivos en cualquier tipo de suelo.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2013, se identificaron de 3,247 captaciones del agua subterránea, de los cuales 2,646 son pozos (81.5%), 129 norias (3.9%), 71 manantiales (2.2%), 2 barrenos (0.1%) y en 399 más (12.3%) en los que no se pudo obtener información.

Del total de aprovechamientos 2,975 se encuentran activos y 272 inactivos; de los aprovechamientos activos, 1,526 (51.3%) se destinan al uso agrícola, 220 (7.4%) son para abastecimiento de agua potable, 165 (5.6%) para uso doméstico, 31 (1.0%) para uso pecuario, 58 (2.0%) para uso industrial, 12 (0.4%) para usos múltiples y 7 (0.2%) para uso recreativo.

En los 956 aprovechamientos restantes (32.1%) no se pudo obtener información, pero es muy probable que la gran mayoría de ellos se utilice en las actividades agrícolas.

El volumen total de extracción estimado de **515.3 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales, 319.4 hm<sup>3</sup>/año (62.0%) son para uso agrícola, 34.2 hm<sup>3</sup> (6.6%) es para uso público-urbano, 8.1 hm<sup>3</sup> (1.6 %) para uso doméstico-pecuario, 9.0 hm<sup>3</sup> (1.7%) para uso industrial, 2.0 hm<sup>3</sup> (0.4%) para uso recreativo, 1.6 hm<sup>3</sup> (0.3%) para usos múltiples y en 141.0 hm<sup>3</sup> (27.4 %) sin información del uso.

Adicionalmente, a través de los **71 manantiales** se descarga un caudal de 105 lps, que representa un volumen anual de **3.3 hm<sup>3</sup>**, destinados principalmente al uso doméstico-pecuario.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para año el periodo 2009-2011, que es el que muestra mayor cantidad de información, con la mejor distribución espacial; en una superficie aproximada de **915 km<sup>2</sup>** de la zona en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos y en la que se cuenta con información piezométrica.

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:

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

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:

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

## 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 riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego; del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

### 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  $\Delta V(S)$ , así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance.

$$Rv + Ri + Eh - B - Dm = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**Rv** = Recarga vertical;

**Ri** = Recarga incidental;

**Eh** = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

**B** = Bombeo;

**Dm** = Descarga a través de manantiales

**$\Delta V(S)$**  = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = B + Dm \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (2)$$

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio 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.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración 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:

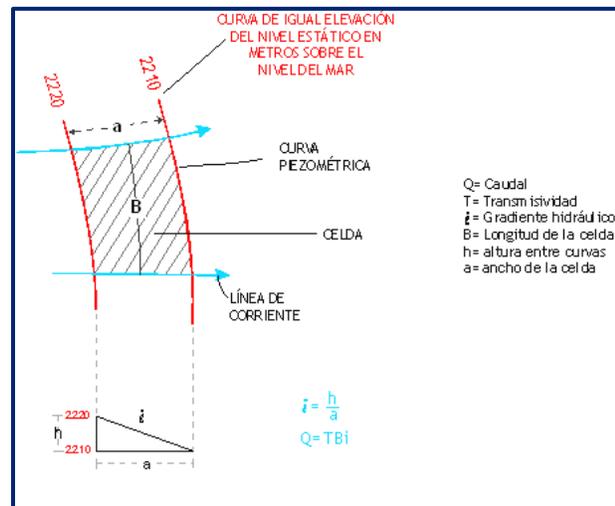
$$Q = B * i * T$$

Donde:

**B**= Largo del canal de flujo;

**i**= Gradiente hidráulico (i);

**T**= Transmisividad en el canal de flujo;



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 y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **264.3 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	3780	820	10	0.01220	0.0006	0.0277	0.9
E2	3190	1010	10	0.00990	0.0006	0.0190	0.6
E3	4620	630	10	0.01587	0.0006	0.0440	1.4
E4	1430	2775	10	0.00360	0.0004	0.0021	0.1
E5	3780	590	10	0.01695	0.0005	0.0320	1.0
E6	7395	670	10	0.01493	0.0005	0.0552	1.7
E7	10085	1050	10	0.00952	0.0015	0.1441	4.5
E8	7565	1010	10	0.00990	0.0015	0.1124	3.5
E9	17650	755	20	0.02649	0.0015	0.7013	22.1
E10	3780	840	20	0.02381	0.0020	0.1800	5.7
E11	3950	1010	10	0.00990	0.0035	0.1369	4.3
E12	3195	520	10	0.01923	0.0030	0.1843	5.8
E13	5460	505	10	0.01980	0.0018	0.1946	6.1
E14	2520	420	10	0.02381	0.0018	0.1080	3.4
E15	5880	462	10	0.02165	0.0018	0.2291	7.2
E16	4450	420	10	0.02381	0.0018	0.1907	6.0
E17	2690	670	10	0.01493	0.0018	0.0723	2.3
E18	1680	1500	20	0.01333	0.0025	0.0560	1.8
E19	1595	590	20	0.03390	0.0015	0.0811	2.6
E20	2775	1010	20	0.01980	0.0015	0.0824	2.6
E21	4455	630	20	0.03175	0.0015	0.2121	6.7
E22	6390	545	20	0.03670	0.0022	0.5159	16.3
E23	5040	670	20	0.02985	0.0022	0.3310	10.4
E24	8825	715	10	0.01399	0.0040	0.4937	15.6
E25	6470	1050	10	0.00952	0.0040	0.2465	7.8
E26	7730	670	10	0.01493	0.0040	0.4615	14.6
E27	3530	1400	10	0.00714	0.0045	0.1135	3.6
E28	5880	1850	10	0.00541	0.0060	0.1907	6.0
E29	4705	630	20	0.03175	0.0060	0.8962	28.3
E30	5295	840	10	0.01190	0.0050	0.3152	9.9
E31	2690	1680	10	0.00595	0.0050	0.0801	2.5
E32	3950	1510	10	0.00662	0.0035	0.0916	2.9
E33	6470	1430	20	0.01399	0.0020	0.1810	5.7
E34	7310	1010	20	0.01980	0.0020	0.2895	9.1
E35	4455	925	20	0.02162	0.0020	0.1926	6.1
E36	5880	1090	30	0.02752	0.0025	0.4046	12.8
E37	4370	715	30	0.04196	0.0025	0.4584	14.5
E38	2185	505	10	0.01980	0.0010	0.0433	1.4
E39	2520	840	10	0.01190	0.0015	0.0450	1.4
E40	3615	1135	10	0.00881	0.0015	0.0478	1.5
E41	7140	920	10	0.01087	0.0015	0.1164	3.7
<b>TOTAL</b>						<b>264.3</b>	

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2013 y otros previos, tanto en este acuífero como en otros vecinos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

### **7.1.3 Recarga incidental (Ri)**

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

### **7.1.4 Recarga incidental (Ri)**

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas.

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró un coeficiente de infiltración de 10 % debido a que la profundidad media a la que se localiza del agua subterránea en la zona agrícola varía de 40 a 60 m y a la permeabilidad media de los sedimentos del subsuelo.

El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 319.4 hm<sup>3</sup> anuales; si consideramos que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de **32.0 hm<sup>3</sup>/año de los excedentes del riego**.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para **uso público-urbano** es de 34.2 hm<sup>3</sup>.

Lo anterior, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y debido a que la profundidad al nivel del agua subterránea en la zona urbana de Celaya es en promedio de 100 m, si tomamos en cuenta que un 5 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo es **de 1.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

Por lo tanto, **Ri = 1.7 hm<sup>3</sup> anuales**

## **7.2. Salidas**

La descarga del acuífero ocurre principalmente por el bombeo (B) y a través de manantiales (Dm).

### **7.2.1 Bombeo (B)**

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **515.3 hm<sup>3</sup>/año**.

### **7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)**

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 71 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 105 lps, que representan un volumen anual de **3.3 hm<sup>3</sup>**

## **7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$**

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2009-2011 mostrada en la figura 6.

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.08 se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 915 km<sup>2</sup>, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**$\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado;

**A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>);

**h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m);

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

Como consecuencia de la explotación intensiva del recurso para abastecimiento de agua potable, la posición del nivel piezométrico ha descendido, propiciado una variación negativa del almacenamiento.

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de  $-403.0 \text{ hm}^3$ , que representa un promedio anual de  $-201.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2011)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-2	-2	53.0	0.08	-8.5
-2 a -4	-3	173.1	0.08	-41.5
-4 a -6	-5	239.7	0.08	-95.9
-6 a -8	-7	393.8	0.08	-220.5
-8	-8	48.4	0.08	-31.0
-10	-10	7.0	0.08	-5.6
<b>Área de balance</b>		<b>915.0</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-403.0</b>
		<b>Promedio anual</b>		<b>-201.5</b>

### 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:

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

$$R_v = 515.3 + 3.3 - 201.5 - 250.2 - 1.7$$

$$R_v = 33.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 33.2 + 250.2 + 33.7$$

$$R = 317.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso, su valor es de **317.1 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 283.4 hm<sup>3</sup> corresponden a la recarga natural y 33.7 hm<sup>3</sup> a recarga incidental.

### 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 el caso del acuífero Valle de Celaya, su valor es de **3.3 hm<sup>3</sup> anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales que está comprometida para uso doméstico-abrevadero.

### 8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **470,252,210 m<sup>3</sup> 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 317.1 - 3.3 - 470.252210 \\ \text{DMA} &= -156.452210 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es **156,452,210 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Celaya, estado de Guanajuato.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Zona del Valle de Celaya, en el estado de Guanajuato. Realizado por GEOPE S.A