



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO ALFREDO V. BONFIL (0326), ESTADO  
DE BAJA CALIFORNIA**

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>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1 Provincia Fisiográfica.....	5
3.2 Clima .....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>8</b>
4.1 Estratigrafía .....	9
4.2 Geología Estructural .....	11
4.3 Geología del subsuelo.....	13
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos .....	15
5.3 Piezometría.....	15
5.4 Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	16
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	17
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>18</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>18</b>
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	19
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	20
7.2 Salidas .....	21
7.2.1 Evapotranspiración Real (ETR) .....	21
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	21
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	22
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ) .....	22
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>23</b>
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).....	24
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>26</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 Alfredo V. Bonfil, definido con la clave 0326 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del Estado de Baja California Sur, abarcando una superficie aproximada de 1,118 km<sup>2</sup>. Colinda al norte con el acuífero Tepentú, al oeste con los acuíferos Santa Rita, Las Pocitas-San Hilario y El Conejo-Los Viejos, al sureste con el acuífero La Paz y al este con el Golfo de California (figura 1). Geopolíticamente se encuentra ubicado en el municipio de La Paz.



Figura 1. Localización del acuífero

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 0326 ALFREDO V. BONFIL**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	30	13.3	24	11	41.2	
2	110	30	38.8	24	10	30.9	
3	110	31	40.3	24	9	30.5	
4	110	31	13.2	24	5	16.7	
5	110	33	57.6	24	3	3.4	
6	110	38	22.2	24	8	48.2	
7	110	41	18.8	24	9	46.6	
8	110	44	9.0	24	12	42.2	
9	110	44	1.2	24	14	46.9	
10	110	45	56.7	24	18	13.6	
11	110	46	8.8	24	24	42.7	
12	110	48	51.8	24	25	34.3	
13	110	51	6.7	24	26	17.0	
14	110	48	33.2	24	30	17.1	
15	110	49	27.5	24	31	13.3	
16	110	47	57.7	24	33	13.4	
17	110	48	34.8	24	42	57.1	
18	110	43	39.9	24	48	25.4	
19	110	45	47.6	24	54	57.5	
20	110	47	37.7	24	56	21.9	
21	110	49	11.9	24	59	22.1	
22	110	52	25.0	24	59	27.9	
23	110	55	5.0	25	2	33.6	
24	110	56	18.6	25	4	31.5	
25	110	54	19.2	25	3	29.7	
26	110	51	34.9	25	4	43.7	DEL 26 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	110	30	13.3	24	11	41.2	

**1.2 Situación Administrativa del acuífero**

El acuífero Alfredo V. Bonfil pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa “Península de Baja California”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Acuerdo que establece el Distrito Nacional de Riego de Baja California Sur, declarando de utilidad pública la construcción de las obras que lo forman”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de julio de 1954.

Este decreto es tipo III el cual permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El usuario principal del agua es el industrial, a través de la empresa Roca Fosfórica Mexicana. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Baja California Sur instalado el 3 de marzo del 2000. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

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

En el acuífero Alfredo V. Bonfil se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos, con el objetivo de conocer la geometría del acuífero, su disponibilidad, condición de explotación y la calidad del agua subterránea.

### **ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALFREDO V. BONFIL, B.C.S.**

Elaborado por Clarión, S.A. Planeación de Agua en 1988. Su principal objetivo fue seleccionar zonas adecuadas para la perforación de pozos y la identificación de sitios propicios para la construcción de obras para el almacenamiento de aguas superficiales. Los resultados indicaron que dadas las características fisiográficas e hidrográficas del área, se puede dividir en dos zonas: 1) Zona Norte, la cual tiene una topografía con gradientes fuertes hacia el mar, 2) la zona sur, en cambio presenta zonas de planicie costera con pendientes menores a 1.5%.

Para el periodo 1973 a 1983 se recopilaron informes, datos y mapas elaborados por diversas empresas para la CONAGUA. Esta información incluye descripción de la geología, piezometría y cortes litológicos de pozos.

## **3. FISIOGRAFÍA**

### **3.1 Provincia Fisiográfica**

De acuerdo con la clasificación de las provincias fisiográficas para la República Mexicana propuesta por Raisz (1964), el área de estudio se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica Baja California, subprovincia Sierra La Giganta y discontinuidad Llanos de La Magdalena. La subprovincia Sierra La Giganta, representa aproximadamente el 45% del territorio. Los rasgos fisiográficos comprenden sierras altas, mesetas, bajadas con lomeríos.

Su proximidad con la margen oriental del estado hace que la planicie costera sea angosta y en algunas partes inexistente, de tal manera que predominan playas con acantilados.

La discontinuidad Llanos de La Magdalena se ubica en la parte central del estado, incluyendo la planicie costera que predomina en la margen occidental, extendiéndose hacia el área donde se ubica la Ciudad de La Paz y más hacia el sur. La morfología característica de esta discontinuidad son las llanuras con desarrollo de dunas evolucionadas sobre suelo salino. Hacia el este de esta discontinuidad la elevación topográfica aumenta y hacia el límite con la subprovincia Sierra de La Giganta se presentan lomeríos, mesetas y bajadas.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen, modificada por E. García (1964), el clima imperante dentro del acuífero es del tipo BW (h') hw (x'), que corresponde a un clima muy seco o desértico, muy cálido y con régimen de lluvias en verano. Hacia las partes altas de la Sierra La Giganta el clima cambia a tipo BW<sub>hw</sub>(x'). Estos climas son muy secos, semicálidos y cálidos, cuya característica principal son sus temperaturas diurnas y la gran sequedad ambiental extremas.

Para el análisis de las condiciones climáticas de la región, se analizó la información de la estación climatológica No 3110 "Alfredo V. Bonfil", con un registro de 31 años que comprende el periodo 1977-2007. La estación se ubica en la parte media, entre la Sierra La Giganta y la línea de costa que es susceptible a la incidencia de lluvias de tipo ciclónico que significan precipitaciones de alta intensidad y corta duración, que generan los escurrimientos superficiales en forma de avenidas torrenciales.

La precipitación se incrementa desde la parte baja de la línea de costa hasta la parte alta de la Sierra La Giganta que alcanza altitudes de 600 a 800 msnm. De acuerdo con los registros de la estación No. 3110 localizada en el poblado de Alfredo V. Bonfil, la precipitación promedio anual es de 150.5 mm, con valor máximo de 402 mm y mínimo de 3 mm.

La temperatura promedio anual es de 23.5 °C, los meses más calurosos son de junio a septiembre con una temperatura máxima de 42 °C en el mes de junio y mínima de 7 °C en el mes de enero.

Por otra parte, la evaporación potencial presenta como valor promedio 1,467 mm anuales, de acuerdo con los datos de la estación No. 3110 localizada en el poblado de Alfredo V. Bonfil, para el mismo periodo de 31 años.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero Alfredo V. Bonfil se ubica en la Región Hidrológica No. 6 (RH6), denominada Baja California Sureste, dentro de la cuenca Isla Coronados-Bahía La Paz que se extiende desde Loreto hasta los límites del acuífero Alfredo V. Bonfil y La Paz, B.C.S.

Los principales arroyos que drenan en el área del acuífero son: La Ardilla, El Quelele, De Enmedio, Rodríguez, Seco y El Cajón. En general el patrón de drenaje en el área de estudio presenta variaciones relacionadas con la litología y la topográfica; el patrón que predomina es dendrítico y paralelo.

### **3.4 Geomorfología**

Los rasgos morfológicos denotan un estado geomorfológico de madurez temprana, en la que destacan las mesetas de rocas volcánicas erosionadas con desnivel de 350 m aproximadamente.

De manera particular en el área de estudio se distinguen unidades geomorfológicas clasificadas como Montañas Altas, Sierras Bajas y Cañadas. Estas geoformas son las que predominan en la parte norte y centro del área del acuífero.

Los rasgos fisiográficos y geomorfológicos de esta zona presentan condiciones pobres para el desarrollo de un acuífero debido a que la vertiente oriental de la Sierra La Giganta, con pendientes que sobrepasan los 45° y próximos a la línea de costa, no permite el desarrollo de una planicie costera que permita la captación y almacenamiento del agua escurrida hacia el litoral de la Bahía de La Paz.

De manera contrastante, en la parte sur del área del acuífero predominan los depósitos sedimentarios de planicies costeras, planicies aluviales y lomeríos disectados. Estos depósitos están limitados al noroeste-oeste y suroeste por las sierras bajas conocidas como Sierra Filos del 35, cuya pendiente del terreno en promedio es menor a los 10°, clasificada como planicie inclinada. Es en esta zona en donde se encuentran la mayoría de los aprovechamientos.

#### 4. GEOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, el área del acuífero de interés se encuentra localizado en la sierra de La Giganta, que cubre la región centro-oriental del estado representada por la parte de sierra que integra las partes bajas, hacia el sur del área del acuífero.



Figura 2. Geología general del acuífero.

La sierra La Giganta está constituida por rocas volcánicas terciarias que varían en litología desde andesitas, riolitas, tobas hasta brechas y conglomerados (figura 2). Esas rocas volcánicas del terciario superior (Ts) han desarrollado una geomorfología variada y que en conjunto reciben el nombre de Formación Comondú. En la planicie costera del Golfo de California se encuentra el Istmo de La Paz, el cual está conformado por lomeríos y sedimentos del Terciario Medio (Tm) de origen marino (Figura 2) que están asociados a las formaciones Tepetate, San Gregorio y San Isidro. En conjunto las dos últimas reciben el nombre de Formación El Cien.

Los depósitos cuaternarios están conformados por aluviones, lomeríos de conglomerados, depósitos lacustres y de litoral

#### **4.1 Estratigrafía**

Las unidades más antiguas pertenecen al Cretácico Superior y están representados por los granitos y pórfidos dacíticos K(Pd) que subyacen discordantemente a las areniscas, limolitas, fangolitas y calizas de edad Paleoceno-Eoceno, correspondientes a la Formación Tepetate. Estas rocas presentan sus mejores afloramientos en la cañada Cerros Atravesados y al norte, hasta las inmediaciones del poblado San Hilario (Schwennicke et al., 1996).

#### **Formación Tepetate**

La Formación Tepetate fue descrita por Heim Arnold (1922), asignándole edad de Paleoceno Superior-Eoceno Superior Temprano; sin embargo, existen muy pocos trabajos recientes que la describan con mayor grado de detalle. La parte basal de esta formación está compuesta por areniscas, limolitas y fangolitas que afloran en la región del arroyo Santa Rita y Colorado, donde los estratos reflejan depósitos siliciclásticos en aguas profundas. En el poblado El Cien la secuencia está compuesta por intercalaciones de fangolita, limolita y arenisca (Shwennicke T. et al., 1996).

Los afloramientos ubicados más al sur y norte (Paleoceno Superior-Eoceno Medio) están constituidos por fangolitas, limolitas, areniscas fosilíferas y calcarenitas, indicando ambiente con sedimentación mixta siliciclástica-calcárea en la plataforma continental externa e interna. Los horizontes arenosos pueden constituir un acuífero regional profundo, que debido a la escasa recarga que recibe generalmente es de bajo rendimiento. Además la calidad del agua es muy variable.

### **Formación El Cien (Miembro San Juan y Cerro Colorado)**

La Formación El Cien (antes llamada Formación San Gregorio y Formación San Isidro) sobreyace a la Formación Tepetate, tiene una edad del Oligoceno Superior a Medio Inferior. Está compuesta de sedimentos marinos clásticos con un espesor que varía de 125 a 175 m y consiste en los miembros San Juan y Cerro Colorado (Fischer et al 1995). El Miembro San Juan está compuesto por rocas tobáceas y frecuentemente por lutitas, areniscas, limolitas fosfáticas, conglomerados y tobas, reflejando un ambiente de depósito que se extiende desde la costa hasta la plataforma abierta.

El Miembro Cerro Colorado está compuesto por areniscas conglomeráticas intercaladas con areniscas coquinoideas, limolitas, areniscas con fosfato retrabajado y en menor proporción lutitas silicificadas con horizontes de tobas. Heim (1922) definió informalmente como Formación San Isidro a limolitas, areniscas y coquinas de origen marino. Autores posteriores (Mina, 1957; Hausback, 1984; Kim, 1987) utilizaron este nombre para estratos que afloran más al sur, en la zona cercana de la ciudad de La Paz. Otros autores se refieren a la Formación El Cien como Formación San Isidro y la describen integrada por una secuencia de rocas sedimentarias de origen marino y vulcanosedimentarias de origen continental de un típico color verdoso. Shwennicke (1992) enumeró y describió a los diferentes ambientes de depósitos en los que se formaron los sedimentos del miembro San Juan. Llega a la conclusión de que el nombre más apropiado y la unidad litológica que mejor describe a las rocas que afloran en San Juan de la Costa, El Cien y el Aguajito es el miembro San Juan de la Formación El Cien.

La sedimentación fue controlada por el levantamiento relativo del nivel del mar y una fuerte influencia terrígena. Los principales afloramientos encontrados dentro de la zona son los situados al Norte, Este y Sur de la localidad de San Hilario.

### **Formación Comondú**

La Formación Comondú aflora formando la Sierra La Giganta cuyo origen se asocia a un arco volcánico del Oligoceno-Mioceno (Heim Arnold, 1922). Está constituida por una alternancia de materiales volcánicos y sedimentarios que incluye areniscas, conglomerados, brechas volcánicas, andesitas y tobas. Las areniscas se presentan bien consolidadas y compactas, en tanto que los conglomerados están constituidos por fragmentos redondeados, de origen ígneo, empacados en arenas.

Ambas litologías se encuentran complejamente interestratificadas e intrusionadas por diques de composición intermedia y básica. Las tobas y brechas presentan una composición predominantemente básica. Las brechas están constituidas por fragmentos de 0.3 a 40 cm de diámetro, empacadas en una matriz tobácea, intrusionadas por diques. Constituye la mayor parte de las elevaciones topográficas que corresponden a la Sierra La Giganta. Presenta una estratificación casi horizontal, con una sensible inclinación hacia el poniente. Su espesor se estima en más de 1,200 metros.

Fue dividida en dos unidades diferentes por Federico Mina (1957). La primera formada por rocas piroclásticas y volcánicas, presenta composición andesítica, basáltica y riolítica, así como conglomerados lenticulares y brechas de talud. La segunda unidad, que subyace a la anterior, está formada principalmente por conglomerados, areniscas y ocasionales argilitas. A través del fracturamiento recarga lentamente el agua retenida durante las lluvias hacia la zona baja, donde se localizan los rellenos aluviales del Cuaternario. Hausback (1984) restringe el nombre de Formación Comondú al arco miocénico representado por rocas volcánicas y volcanoclásticas que conforman el grueso de la Sierra de La Giganta presenta permeabilidad secundaria por fracturamiento y buena calidad del agua al no estar en contacto con las evaporitas de la planicie costera.

### **Depósitos Cuaternarios**

Están representados por sedimentos clásticos que forman terrazas continentales, constituidas por arena y conglomerado polimíctico semiconsolidado [TplQ(cg)], que sobreyacen discordantemente a rocas volcanoclásticas de la Formación Comondú y a rocas sedimentarias de ambiente marino de la Formación San Gregorio. Durante el Holoceno se depositaron sedimentos continentales constituidos por conglomerado polimíctico mal consolidado [Q(cg)], depósitos de aluvión que varían de limos a cantos rodados [Q(al)], litorales y eólicos que forman dunas [Q(li)]. Estas acumulaciones se localizan en las márgenes de los arroyos y sobre la línea de costa en el Golfo de California.

### **4.2 Geología Estructural**

El marco tectónico de la península se encuentra íntimamente ligado con la historia geológica del margen noroccidental mexicano durante el Mesozoico Superior - Terciario Inferior y a la posterior apertura del Golfo de California.

El margen continental del noroccidente de México fue la placa superior o pasiva de una frontera de placas convergentes a lo largo de la mayor parte del Terciario (Atwater, 1970) lo que produjo un arco volcánico. Las rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno en el occidente de México están relacionadas con esta subducción terciaria. El marco geológico de la región del Golfo de California y de la Península de Baja California, así como los eventos magmáticos están íntimamente conectados con los regímenes tectónicos de esta subducción del Terciario (entre 16 a 12.5 Ma.) y con un proceso de apertura continental, bajo un marco tectónico de extensión que inició aproximadamente hace 13 Ma.

La formación de corteza oceánica en el Golfo de California probablemente inició hace 8.3 Ma. Según un modelo reciente de Lyle y Ness (1991), desde ese momento, la península se ha desplazado hacia el noroeste, estimándose por medio de tres modelos de la deriva continental un desplazamiento de 450 a 600 km desde hace 14 Ma.

El sistema estructural de esta región se presenta en gran parte enmascarado por la presencia de depósitos cuaternarios. La mayoría de las estructuras se relacionan con la apertura del Golfo de California.

Estructuralmente, el área presenta una morfología de bloques escalonados con basculamientos, provocados por fallamiento normal. Las estructuras principales son fallas normales cuyos rumbos varían de 10°N a 60°E, con inclinaciones de 72° a 85° al SE y NW y de N15° a 60°W con inclinaciones de 70° a 80° al NE y SW. Una de las estructuras más importantes es la falla Potosí, que presenta rumbo variable de NW17° a 25°NE, e inclinaciones al NE y SE de 67° a 72° y longitud aproximada de 7 km. Esta falla es la responsable del desplazamiento a profundidad de los mantos de fosforita de la parte sur de la zona mineralizada de San Juan de la Costa. Dicha estructura es cortada por fallas normales con desplazamiento lateral de rumbo NW76° a 82°SE e inclinaciones del orden de 80° al SW.

La secuencia sedimentaria de la Formación Tepetate en la porción sureste, presenta plegamiento débil, originando anticlinales y sinclinales con flancos muy abiertos. La Formación San Gregorio en términos generales tiene un comportamiento subhorizontal, con algunos basculamientos locales, provocados por fallas regionales del sistema NE-SW y NW-SE, con desplazamientos verticales de 6 a 40 m en promedio.

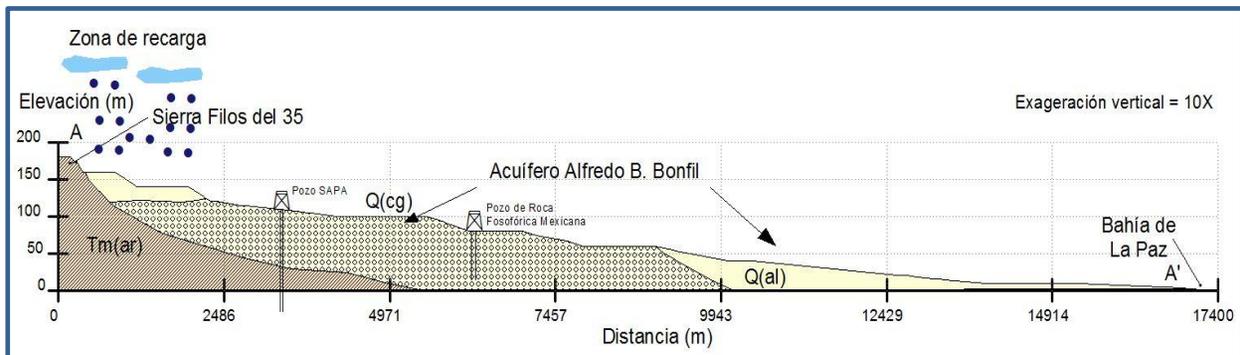
El área que cubre el acuífero se encuentra en una zona que estructuralmente presenta mayor dislocamiento en su porción oriente. El análisis estructural de este sector permite interpretar los paleoesfuerzos distensivos en dirección NW-SE, que actuaron durante Oligoceno Superior - Mioceno Inferior, basándose en la existencia de un cuerpo sin sedimentario de fosforita, emplazado en el sistema de rumbo NE-SW, en fracturas de tensión dentro de las lutitas de la Formación San Gregorio, que encajonan a las capas de fosforita.

#### 4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de los cortes litológicos de pozos y las evidencias de campo es posible definir que el acuífero se aloja en los sedimentos aluviales, fluviales y conglomerados provenientes de la erosión de las partes altas de las Sierras Filos del 35, Las Tarabillas y La Giganta, que han sido transportados por los escurrimientos superficiales y depositados en los cauces de los arroyos y en la delgada planicie costera. Su espesor varía desde algunos metros hasta 100 m y conforma un acuífero de baja capacidad de almacenamiento debido a sus reducidas dimensiones, tanto en planta como en la vertical. Este es el acuífero que actualmente se explota; sin embargo, a mayor profundidad las rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas de las formaciones El Cien y Comondú aportan caudales significativos cuando se interceptan los sistemas de fracturamiento

El acuífero se encuentra bordeado por las rocas volcánicas de las facies impermeables de la Formación Comondú, que constituyen las barreras lateral e inferior y al oriente por una frontera de carga constante representada por el Golfo de California. La figura 3 muestra una sección geológica esquemática típica de la porción sur del acuífero.

Figura 3. Sección geológica esquemática de la porción sur del acuífero



La frontera al oeste está definida por la falla La Giganta, enmarcada por la Sierra Filos del 35, que ha desplazado los depósitos de arenisca del Terciario (Tm(ar)) de la Formación Comondú.

Este mismo horizonte se extiende sobreyaciendo los depósitos piroclásticos y tobas riolíticas de la misma Formación Comondú. Los depósitos sedimentarios, en donde se localiza el mayor espesor del acuífero, están representados por conglomerados y aluvión del Cuaternario.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

De acuerdo con la información geológica y piezométrica es posible identificar que el acuífero es de tipo libre y está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y conglomerados, depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera; la porción inferior está alojada en un medio fracturado en rocas sedimentarias y volcánicas de las formaciones El Cien y Comondú, como lo demuestran algunas perforaciones productoras.

El acuífero tiene reducidas dimensiones y poca capacidad de almacenamiento. El medio granular se restringe a una delgada planicie costera. Hacia las porciones central y norte no existen condiciones geomorfológicas que permitan el desarrollo de un acuífero, debido a que predominan las geoformas de montañas bajas, mesetas y cañadas que se encuentran muy cerca de la línea de costa y las planicies costeras son angostas y en algunos casos inexistentes.

La alimentación del acuífero proviene, en su mayoría, de la infiltración en la planicie de los escurrimientos superficiales originados en las partes altas por la precipitación pluvial.

La descarga se produce de manera natural por flujo subterráneo hacia el mar y por evapotranspiración en zonas que presentan niveles freáticos someros, de manera artificial se efectúa por medio de la extracción que se lleva a cabo por medio de las captaciones.

Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es bajo, la presencia ocasional de los huracanes tiene un efecto muy importante sobre la recarga de los acuíferos.

## 5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de estudio de Prospección Geohidrológica realizado en 1988 (Clarión, S.A), se ejecutaron 3 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De acuerdo con los resultados de su interpretación se determina que los valores de transmisividad varían de  $2.5 \times 10^{-3}$  a  $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un promedio de  $2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Las pruebas no contaron con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

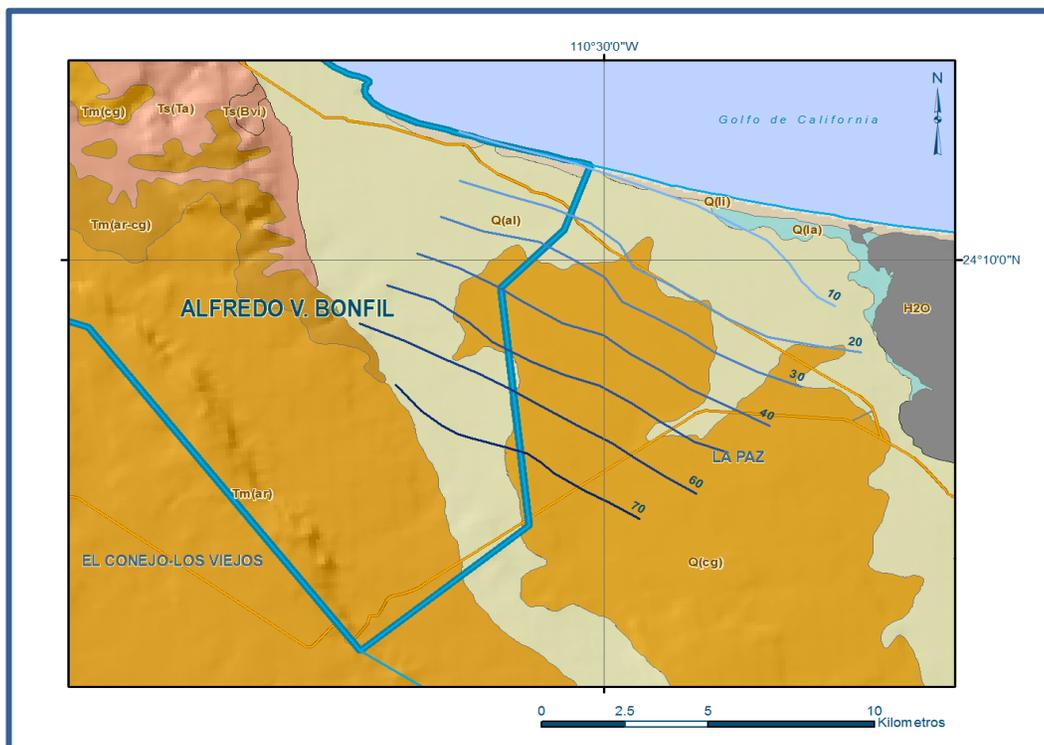
## 5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea y del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2000-2009.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2009 que se muestra en la figura 4, presenta valores máximos de 50 a 70, localizados en el área del ejido Alfredo V. Bonfil y hacia el Rancho 3 Hermanos, por efecto de la topografía; mientras que los valores mínimos, de 10 a 20 m, se registran hacia la zona costera. (figura 4).



Profundidad al nivel estático en m (2009)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2009 (figura 5), presenta valores de -5 a -15 msnm, hacia los pozos ubicados en la zona de Los Escalones y El Quelele, los cuales generan el cono de abatimiento. Los valores positivos de elevación del nivel estático, de 5 a 10 msnm, se localizan en la porción sur del acuífero, en la zona que se presentan las entradas por flujo subterráneo.

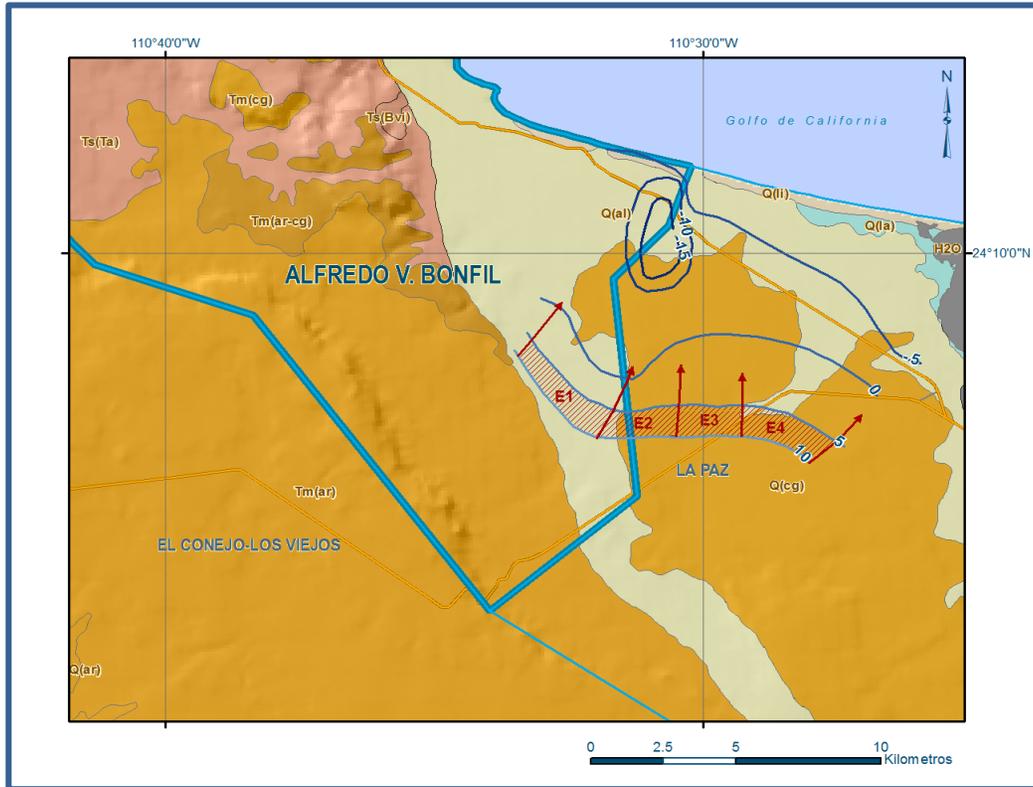


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el período 2000-2009 se observan valores de abatimiento que varían entre 1.0 y 10.0 m, que representan un ritmo anual de 0.1 a 1.1 metros (figura 6). Los mayores abatimientos se registran en los aprovechamientos localizados en la porción central del área de balance, entre el Ejido Alfredo V. Bonfil y El Quelele, donde se concentra la extracción para uso agrícola.

Por el contrario, hacia la zona donde se ubica el pozo de la zona Los Escalones, se registran recuperaciones de hasta 10 metros, que representan 1.1 m anuales.

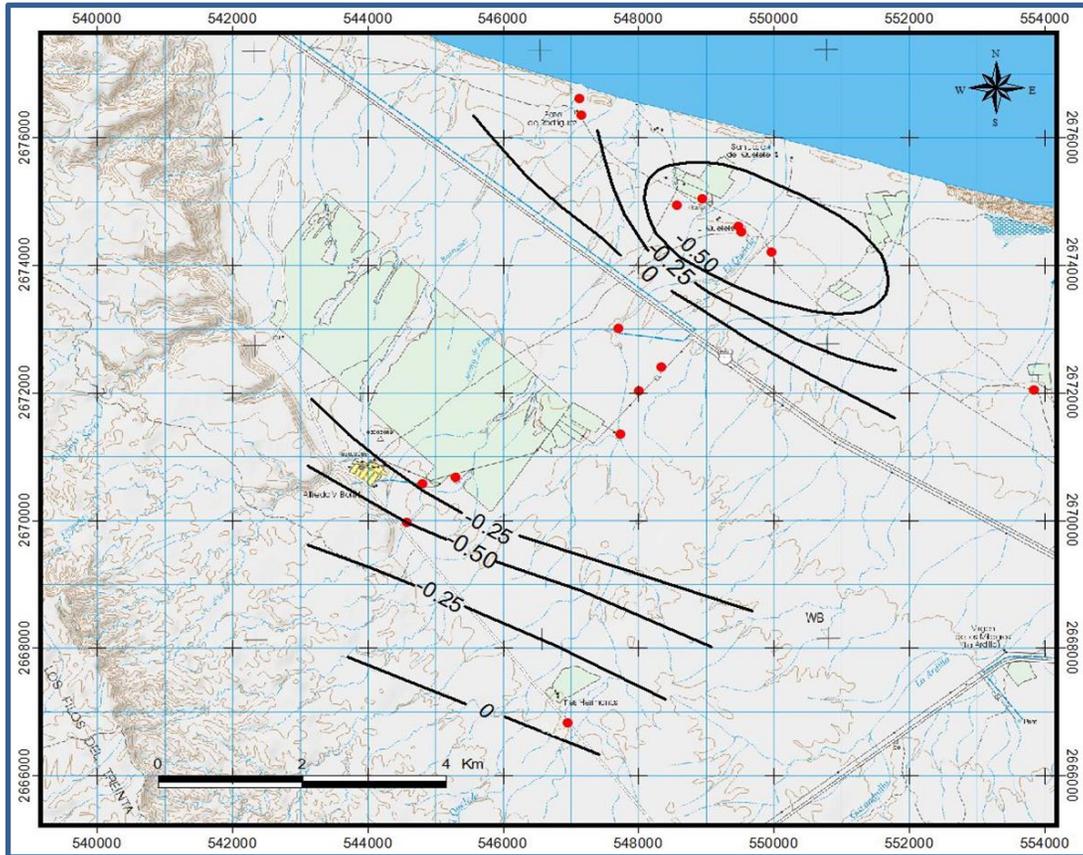


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2000-2009)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Con el propósito de actualizar la información de la calidad química del agua prevaleciente en el acuífero, durante el año 2009, la Dirección Local de la CONAGUA en Baja California Sur tomaron muestras de agua subterránea en cuatro aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Realizando *in situ* la determinaciones de pH, temperatura y conductividad eléctrica, cuyo valor es directamente proporcional al contenido de los sólidos totales disueltos (STD).

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de STD de los pozos ubicados en la zona del Datilito y el Quelele presentan sólidos totales disueltos mayor a los 2,500 ppm, por arriba del valor máximo permisible de 1000 mg/lit establecido 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.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del último censo realizado en el año 2009, se registraron un total de 30 aprovechamientos, todos ellos pozos activos. De ellos, 20 (66.7%) se destinan al uso doméstico-abrevadero, 4 (13.3%) para uso agrícola, 3 más (10%) al uso industrial y los 3 pozos restantes (10%) para uso público-urbano.

El volumen de extracción conjunta asciende a **5.2 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 2.2 hm<sup>3</sup> (42.3%) son para uso agrícola, 1.3 hm<sup>3</sup> (25%) para uso público-urbano, 1.6 hm<sup>3</sup> (30.8%) para uso industrial y los 0.1 hm<sup>3</sup> restantes (1.9 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

La cuantificación de los volúmenes de extracción se realizó utilizando métodos directos e indirectos, según el uso: para el agua destinada a la agricultura se empleó la superficie y lámina de riego; para el uso industrial se obtuvieron los promedios de consumo mediante la lectura de los medidores volumétricos de flujo.

Finalmente para el cálculo de la extracción destinada al abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región se utilizó el número de habitantes (INEGI, 2005) de los ejidos El Bonfil, El Centenario y Chametla, y la dotación promedio por habitante en litros por día.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2000 - 2009, en una superficie de 109 km<sup>2</sup> del área que cubre el acuífero, en la que están dispersos los aprovechamientos.

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:

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

## 7.1 Entradas

### Recarga

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos ( $R_v$ ) 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 y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida ( $R_i$ ). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, no existe recarga inducida.

#### 7.1.1 Recarga vertical ( $R_v$ )

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

$$R_v + E_h - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**$R_v$ :** Infiltración por lluvia

**$E_h$ :** Recarga por flujo horizontal

**$B$ :** Bombeo

**$Sh$ :** Salidas por flujo horizontal

**$ETR$ :** Evapotranspiración real

**$\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + Sh + ETR \pm \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

### 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. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, a partir de las configuraciones de elevación del nivel estático para los años 2000 y 2009 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

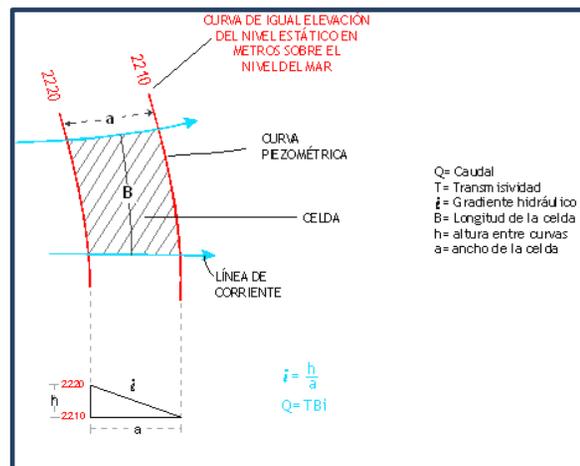
Donde:

**Q** = gasto que pasa por un determinado canal de flujo;

**T** = transmisividad;

**B** = largo de la celda;

**i** = gradiente hidráulico



Se seleccionaron las celdas de flujo de acuerdo a la geología. Una celda de entrada se localiza a la entrada del Arroyo Boca de La Magdalena y dos más al sur del poblado Palo Verde, en la desembocadura del Arroyo Las Cuevitas.

Las entradas por flujo subterráneo horizontal calculadas para el año 2009 se muestran en las tablas 2. En la configuración de elevación del nivel estático se presentan entradas subterráneas de agua marina, cuyo valor no se incluye en el balance de aguas subterráneas debido a que es agua de mala calidad y al hacerlo se incrementaría el valor de la recarga. Adicionalmente, este tipo de agua de mala calidad no está sujeta al otorgamiento de concesiones.

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo para el año 2009.

Canal	Largo (B) (m)	Ancho (a) (m)	h2 - h1 (m)	Gradiente Hidráulico i	T (m <sup>2</sup> /s)	Caudal Q = TBi (m <sup>3</sup> /s)	Volumen (hm <sup>3</sup> /año)
E1	4800	650	5	0.008	0.003	0.074	3.5
E2	2230	700	5	0.007	0.001	0.016	0.5
E3	2240	720	5	0.007	0.001	0.016	0.5
E4	2380	700	5	0.007	0.001	0.017	0.5
<b>Total de entradas =</b>							<b>5.0</b>

Los valores de T se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas. El valor promedio anual de las entradas por flujo subterráneo es de **5.0 hm<sup>3</sup>/año**.

## 7.2 Salidas

### 7.2.1 Evapotranspiración Real (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

Debido a que salvo una pequeña porción noroccidental del área de balance, próxima a la costa, los valores de profundidad al nivel estático son mayores a los 10 m y no existe cobertura de vegetación importante, se considera que, para los fines del balance de aguas subterráneas el valor de la evapotranspiración es despreciable. Por lo tanto, **ETR = 0 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, de acuerdo con el censo e hidrometría realizados en el año 2009, el valor de la extracción por bombeo asciende a **5.2 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas horizontales se calculan de la misma manera como se evalúan las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático. Para el caso de la configuración del año 2009 el flujo subterráneo se invirtió como consecuencia de la concentración de la extracción para uso agrícola por parte del Ejido Alfredo V. Bonfil y de uso industrial a través de los pozos concesionados a Roca Fosfórica Mexicana. Es por ello que para condiciones actuales las salidas por flujo horizontal se consideran nulas. **Sh = 0 hm<sup>3</sup>/año.**

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

Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático 2000-2009 (figura 6) y considerando un coeficiente de almacenamiento de 0.15, obtenido como promedio en el acuífero La Paz y adoptado por correlación hidrogeológica, se determinó la variación del almacenamiento con la siguiente expresión:

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

Donde:

- $\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)
- h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período (m)

A nivel de todo el acuífero se manifiesta un cambio de almacenamiento de -3.0 hm<sup>3</sup> para el periodo 2000-2009, que equivalen a -0.3 hm<sup>3</sup> anuales (tabla 3).  **$\Delta V(S) = - 0.3$  hm<sup>3</sup>/año**

Se considera que el trazo de las curvas de igual evolución está apoyado en valores puntuales positivos y negativos; además el cambio de almacenamiento está influenciado por la concentración de aprovechamientos dentro de la zona de mayor extracción para uso industrial y agrícola.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2000–2009)

Evolución (m)	Abatimiento promedio (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
0	-0.3	45.5	0.15	-1.7
-0.25 a -0.5	-0.4	12.5	0.15	-0.7
> -0.5	-0.7	5.5	0.15	-0.6
<b>Área de balance</b>		<b>63.5</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-3.0</b>
		Promedio anual		<b>-0.3</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:

$$R_v = B + Sh + ETR - \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 5.2 + 0.0 + 0.0 - 0.3 - 4.9$$

$$R_v = 0.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.0 + 4.9 = 4.9$$

$$R = 4.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

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, su valor es de **4.9 hm<sup>3</sup>/año**.

### **8.2 Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, su valor es de **DNC = 0.0 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **2,764,430 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 4.9 - 0.0 - 2.764430 \\ \text{DMA} &= 2.135570 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **2,135,570 m<sup>3</sup> anuales.**

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

CONAGUA, 2000- 2009. Información piezométrica del acuífero Alfredo V. Bonfil, Municipio La Paz, B.C.S.