



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO BAHÍA DE LOS ÁNGELES (0226),  
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>4</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>7</b>
4.1 Estratigrafía .....	9
4.2 Geología estructural .....	10
4.3 Geología del subsuelo.....	10
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Parámetros hidráulicos .....	12
5.3 Piezometría.....	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	14
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	15
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>15</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>16</b>
7.1 Entradas.....	17
7.1.1 Recarga natural (Rv).....	17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
7.2 Salidas .....	18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	18
7.2.2 Bombeo (B) .....	20
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	20
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ) .....	20
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>21</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	22
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	22
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	23
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>24</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 Bahía de los Ángeles, definido con la clave 0226 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Baja California, entre los paralelos 28°38'47.9" y 28°55'51.4" de latitud Norte y los meridianos 113°21'0.2" y 113°37'0.7" de longitud Oeste, tiene una superficie aproximada de 525 km<sup>2</sup>. Colinda al norte con el Golfo de California, al noroeste con el acuífero Agua Amarga, al oeste con Nuevo Rosarito y al sureste con La Bocana-Llanos de San Pedro (figura 1).

Geopolíticamente se encuentra completamente en el municipio de Ensenada.

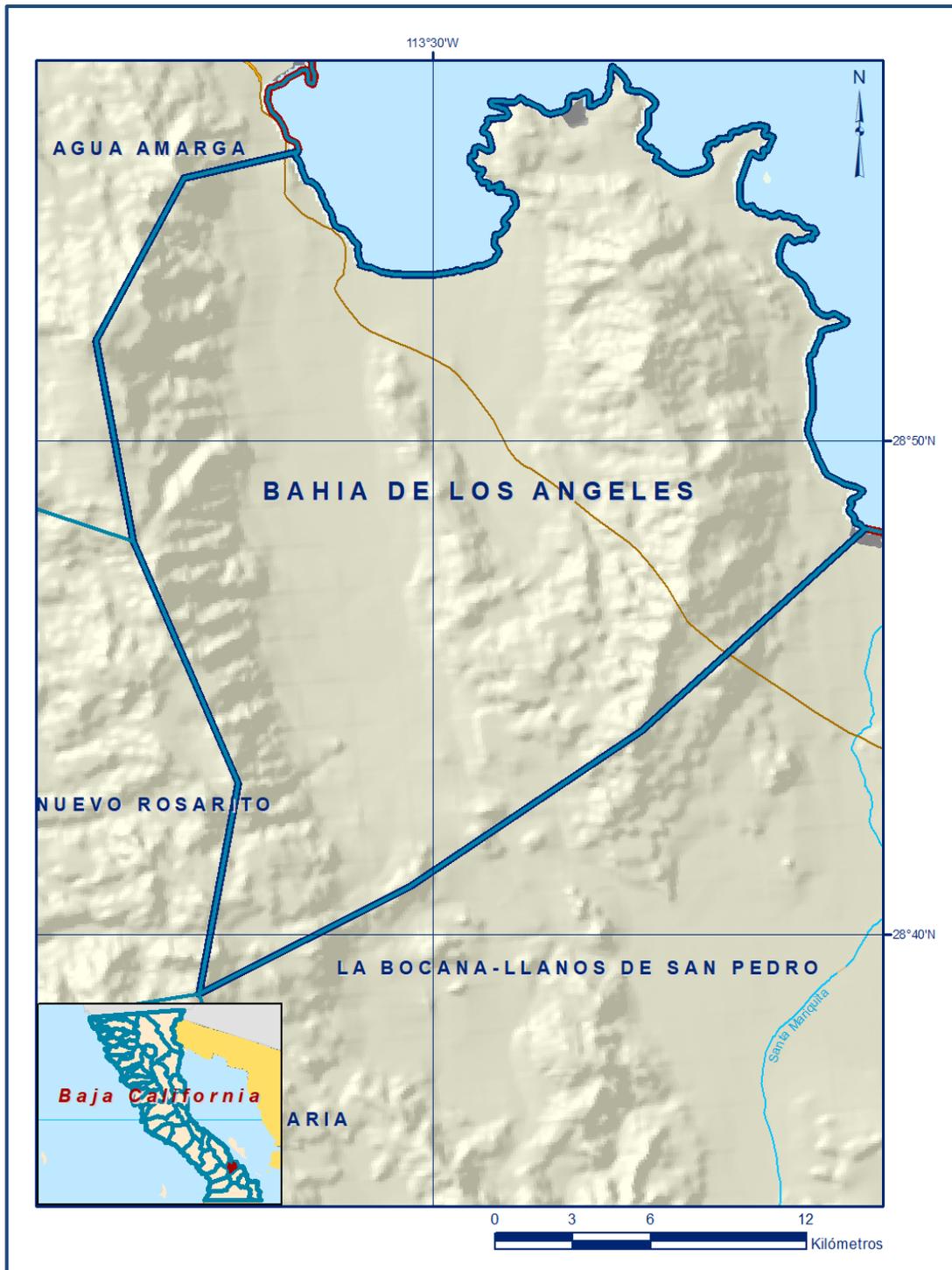


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada

ACUIFERO 0226 BAHIA DE LOS ANGELES							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	113	32	48.1	28	55	514	DEL 1AL 2 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	113	21	0.2	28	48	13.5	
3	113	25	40.4	28	44	7.6	
4	113	30	29.3	28	40	57.3	
5	113	34	51.3	28	38	47.9	
6	113	34	2.5	28	43	4.3	
7	113	36	13.5	28	47	58.5	
8	113	37	0.3	28	52	2.3	
9	113	35	10.0	28	55	20.1	
1	113	32	48.1	28	55	514	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California” y su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”*.

Publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965, esta veda se clasifica como tipo III, que 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 uso principal del agua subterránea es el agrícola.

En su territorio no existen Distritos de Riego y actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). Su territorio completo se encuentra dentro de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Valle de los Cirios”, con fecha de decreto 20 de junio de 1980.

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la región que comprende el territorio que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**ESTUDIO DE APRECIACIÓN PRELIMINAR DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL VALLE DE BAHÍA DE LOS ÁNGELES EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, ELABORADO POR LA EMPRESA TÉCNICAS MODERNAS DE INGENIERÍA S. A., PARA LA SECRETARÍA DE RECURSOS HIDRÁULICOS, EN 1974.**

El objetivo del estudio fue determinar las características hidrogeológicas del valle con fines de exploración y explotación del agua subterránea. Se realizó un censo de aprovechamiento y un reconocimiento geológico. De acuerdo con el estudio, el poblado Bahía de los Ángeles se abastecía con galerías filtrantes o tajos que captaron el depósito de talud, ubicado en la ladera de la sierra, con una capacidad de extracción de 1 lps para uso público-urbano; se identificaron 3 aprovechamientos, 2 norias y 1 pozo, destinados al uso doméstico y abrevadero, que contenían altas concentraciones de sólidos totales disueltos, que variaba entre 5 339 y 29 783 ppm.

**ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS ACUÍFEROS EL ROSARIO, VILLA DE JESÚS MARÍA, BAHÍA DE LOS ÁNGELES, LA RUMOROSA-TECATE Y SAN RAFAEL-LA PALMA, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua, a través del Organismo de Cuenca Península de Baja California, en 2007.**

Mediante actividades de campo que incluyeron el análisis y localización del censo de aprovechamientos registrados en el REPDA, piezometría, nivelación diferencial de brocales, recopilación de información hidrogeológica y la realización de algunos reconocimientos y estimaciones de campo, fue posible plantear el balance de aguas para evaluar la recarga media anual que reciben los acuíferos y, a partir de ella, calcular su disponibilidad. Los resultados y conclusiones del estudio de 2007 fueron 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 Provincia fisiográfica**

El acuífero se encuentra localizado dentro de la provincia Sierras de Baja California, Subprovincia Sierra Volcánica (Según Miguel Álvarez Jr.); localmente se caracteriza por exhibir un relieve abrupto conformado por sierras que se encuentran orientadas en sentido norte-sur y noroeste-sureste, con elevaciones que alcanzan los 1600 msnm y sobresalen hasta 1000 m con respecto a la elevación de los valles.

Las sierras dispuestas paralelamente a la costa del Golfo de California continúan hacia el mar sin formar ninguna llanura costera.

Dentro de las principales elevaciones se encuentran las sierras Las Ánimas, Las Flores, La Libertad, Salorio, El Toro y Cinta de La Cantera. Las depresiones se encuentran ocupadas por los Valles Agua Amarga, Rinconada de Salorio y Las Flores (Bahía de los Ángeles). En la porción oriental se localiza la sierra Las Ánimas, constituida por rocas basálticas muy fracturadas y falladas, coronadas por rocas post-batolíticas representadas tanto por tobas y brechas riolíticas como por rocas basálticas.

La sierra La Libertad cuenta con elevaciones prominentes, se ubica en la parte central del área y está constituida en su mayor parte por rocas ígneas intrusivas, principalmente granitos, granodioritas y tonalitas, así como la presencia de algunos afloramientos aislados de rocas volcánicas y sedimentarias en su margen occidental. Hacia el Valle Bahía de los Ángeles, termina en forma brusca y acantilada, debido al cabalgamiento regional.

### **3.2 Clima**

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de México, regionalmente predomina el clima muy seco (BS), o desértico con oscilaciones térmicas sensibles que alcanzan régimen extremoso, con algunas zonas calurosas durante el día y noche que van de frías a muy frías.

La información climatológica se obtuvo de la estación climatológica 002 Bahía de los Ángeles ubicada al este del acuífero, con un periodo de registro de 53 años, de 1953 a 2006. De acuerdo con los registros de esta estación, la temperatura media anual es de 27.6° C; el mes de julio es el más caluroso en promedio con una temperatura de 30° C y el más frío es enero con 13° C.

Las lluvias son muy escasas en la mayor parte de la región, con una precipitación media anual de 76 mm, máxima extraordinaria de 235 mm, registrada en 1983, y mínima de 9 mm registrada en 1986; las precipitaciones se presentan principalmente de octubre a marzo. La evaporación potencial media anual es de 2020 mm.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 5 “Baja California Centro- Este”, que se caracteriza por ser una larga faja de la vertiente del Golfo de California. El desarrollo del litoral que le corresponde es de 465 km, con un ancho máximo de 50 km.

El acuífero está integrado por las cuencas hidrográficas Bahía de los Ángeles y Agua Amarga. La red hidrográfica que recarga el acuífero es aportada por una serie de arroyos que tienen origen en el flanco este de la Sierra La Libertad: La Terminal, San Juan, Cañada La Borreguera, Cañada El Tigre, Cañada La Víbora y El Pulpo; los primeros cuatro arroyos integran el Arroyo La Gobernadora, que escurre longitudinalmente en el flanco este del valle.

En la porción oeste de la Sierra La Libertad, escurre el arroyo El Cañoncito-Angostura, que drena la zona conocida como Rinconada Salorio e integra una cuenca con una superficie aproximada de 100 km<sup>2</sup>, el cual finalmente descarga al norte del Poblado Bahía de los Ángeles, en el Golfo de California. El funcionamiento de esta pequeña subcuenca es independiente, aun cuando corresponde a la cuenca Bahía de los Ángeles.

La porción sureste del valle se integra desde la Sierra Las Ánimas, el Arroyo La Tinaja al de La Gobernadora. De la Sierra Las Flores escurren hacia el oeste pequeños arroyos que se incorporan al Arroyo La Gobernadora.

### **3.4 Geomorfología**

La zona del acuífero se encuentra limitado al poniente por la Sierra La Libertad y al oriente por las sierras Las Ánimas y Las Flores, con un desarrollo desde la línea de costa hacia el sur de más de 26 km de longitud y 5 km de amplitud. La superficie está cubierta predominantemente por depósitos aluviales, eólicos, lacustres y fluviales.

## **4. GEOLOGÍA**

Las unidades expuestas en el acuífero varían del Mesozoico Inferior al Reciente. La base de la secuencia mesozoica está representada por rocas metasedimentarias ortometamórficas e ígneas intrusivas batolíticas, cuya edad probable es el Triásico; en ella se encuentran paquetes interdigitados de esquistos, filitas, pizarras y gneises (figura 2).

Las rocas de edad Cretácica están representadas por rocas ígneas intrusivas, metamórficas con metamorfismo incipiente y zonas intrusivas con bandeamiento, localizado en los bordes de las masas intrusivas. Dentro de las rocas intrusivas expuestas predominan las tonalitas y granodioritas, de color gris claro, con tonos blanquecinos, que muestran textura holocristalina de grano grueso; los granitos presentan color gris claro con tonalidades rojizas y se encuentran muy fracturados.

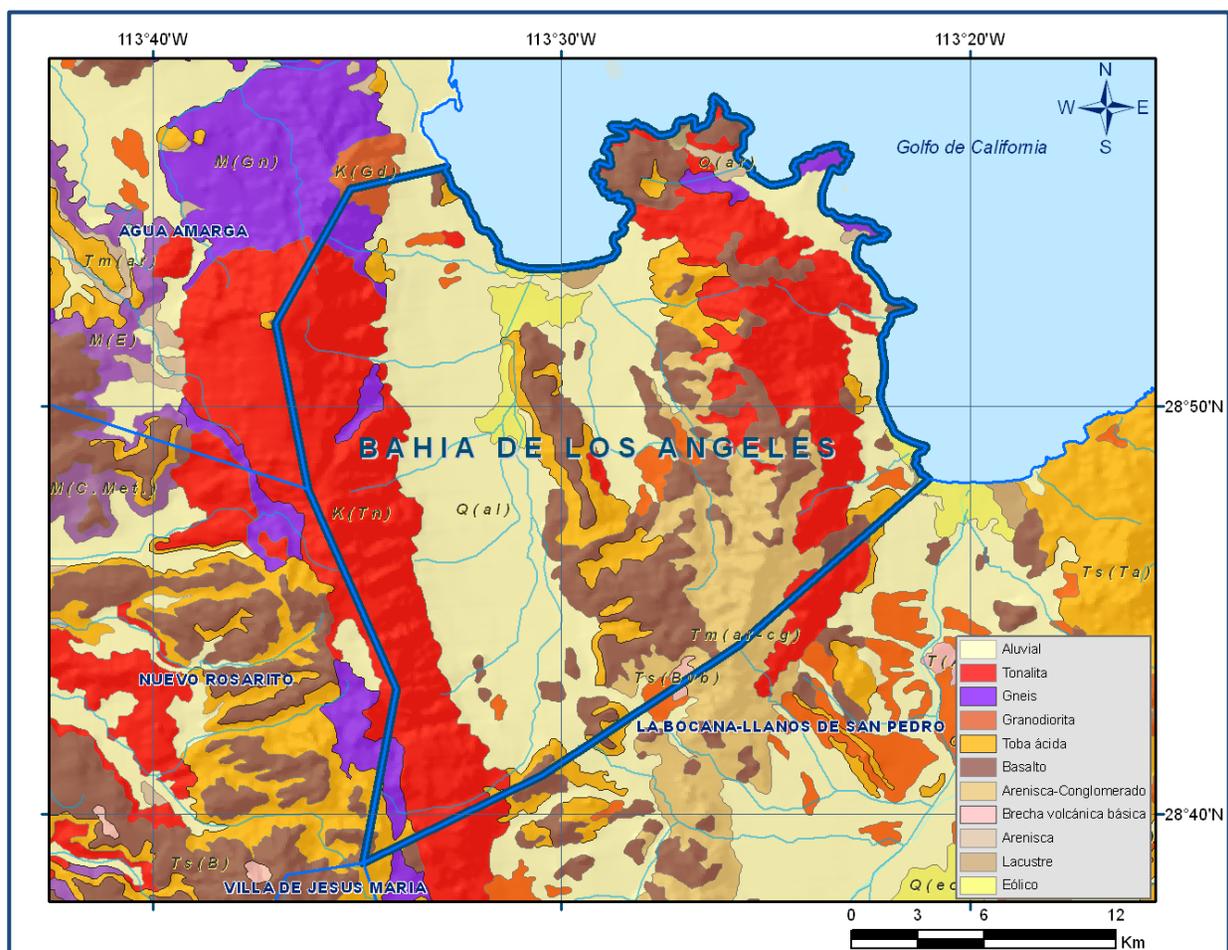


Figura 2. Geología general del acuífero

Las rocas intrusivas básicas son las más antiguas dentro del acuífero, mientras que las de composición ácida corresponden a edades más recientes, las cuales se encuentran encajonadas en la unidad básica y subyacen a las diferentes unidades del Cenozoico, aflorando generalmente en franjas orientadas de noreste a sureste.

#### **4.1 Estratigrafía**

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área.

##### **Formación Tepetate (Tiar-Im)**

Litológicamente esta unidad marina consiste en una intercalación de areniscas amarillentas a café rojizas, con areniscas conglomeráticas, lodolitas y fangolitas con lentes concrecionales.

Las areniscas se presentan en estratos, por lo general delgados a medianos de no más de 40 cm de espesor, con una ligera inclinación hacia el mar, de grano fino y con buena clasificación; algunas capas tienen residuos de halita (NaCl). Presenta un sistema de fracturas de espaciamiento moderado, con relleno de yeso, así como estratos muy fosilíferos con abundantes turrítelas y foraminíferos.

##### **Formación Alisitos (Krm)**

Constituida por una serie de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias; las primeras de composición andesítica, mientras que las rocas sedimentarias están constituidas por la denudación de las rocas volcánicas y vulcanoclásticas. Están afectadas por un proceso de dinamometamorfismo el cual disminuye de oriente a poniente. Esta unidad se encuentra coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico en forma discordante; con un espesor máximo de 5000 m.

##### **Plioceno**

Representado por rocas de origen marino y continental, esta unidad está constituida por areniscas de grano fino, aparentemente sin cementante arcilloso y conglomerados formados por fragmentos de rocas volcánicas e ígneas intrusivas embebidos en una matriz calcárea. Dentro del área las rocas sedimentarias presentan una distribución restringida.

Las unidades que cubren mayor área de exposición dentro del acuífero corresponden a los depósitos sedimentarios no consolidados del Cuaternario y Reciente, representados por material aluvial, piamonte, fluvial, eólico, lacustre, arcillas y conglomerados.

A estas unidades se les encuentra formando planicies aluviales así como rellenos de los valles fluviales, su mayor espesor se encuentra dentro del Valle de Bahía de los Ángeles. A continuación se describen estas unidades:

### **Unidad Aluvial (Qal)**

Constituida por arenas limpias de diferente granulometría, por gravas y gravillas bien graduadas derivadas de rocas ígneas intrusivas, metamórficas, volcánicas y sedimentarias preexistentes. Esta unidad presenta mayor importancia por su capacidad para almacenar agua.

### **Unidad Eólica (Qeo)**

Integrada por arenas de grano fino a medio, bien redondeadas y clasificadas, derivadas de rocas ígneas y metamórficas; que presentan fragmentos de moluscos. Esta unidad está expuesta en las zonas costeras donde forma dunas dispuestas de manera paralela a la línea de costa; en algunos valles se presenta con un espesor de unos cuantos metros.

### **Unidad Lacustre (Qla)**

Compuesta por estratos delgados y laminares de arenas finas intercaladas con horizontes de arcillas, esta unidad se localiza en la línea de costa del Valle Agua Amarga. Debido a su origen y constitución granulométrica, almacenan agua con altas concentraciones de sólidos totales disueltos.

## **4.2 Geología estructural**

La zona del acuífero Bahía de los Ángeles se caracteriza por una intensa actividad tectónica. En la zona se encuentran las siguientes fallas normales: Falla Ballenas, Falla Partida y Falla San Lorenzo (Escalona-Alcázar, 1999).

## **4.3 Geología del subsuelo**

De acuerdo con la interpretación de la geología del subsuelo y las características de las unidades litológicas que lo conforman, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, de tipo libre, conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente. Estas son las formaciones que se explotan actualmente.

El medio granular está constituido por materiales aluviales de granulometría variada que constituyen el relleno de los valles y el medio fracturado está conformado por la secuencia de areniscas y conglomerados, así como las rocas volcánicas (tobas y basaltos).

Existe interconexión hidráulica entre ambos medios, de tal manera que el espesor del acuífero puede alcanzar varias centenas de metros en el centro de los valles, dependiendo de la profundidad del fracturamiento, y disminuir gradualmente hacia los flancos de las sierras que los rodean.

Verticalmente la frontera superior es la posición del nivel freático y las fronteras inferiores y laterales están constituidas por las rocas que constituyen el medio fracturado, cuando su permeabilidad secundaria por fracturamiento desaparece, así como las rocas ígneas intrusivas y metamórficas que conforman las sierras que delimitan el acuífero. De acuerdo a los afloramientos de rocas, se pueden identificar tres unidades hidrogeológicas:

### **Unidad permeable**

Esta unidad la constituyen depósitos sedimentarios aluviales, integrados por arenas de diferente granulometría, gravas y gravillas; se caracteriza por su elevada permeabilidad.

Se consideran las acumulaciones de pie de monte y fluviales que integran material grueso, arenas gruesas y arcillas; además de los depósitos eólicos y areniscas limpias. Por su exposición reducida los depósitos eólicos no tienen importancia hidrogeológica.

### **Unidad Semipermeable**

Esta unidad volcánica está representada por tobas y basaltos, que por su intenso fracturamiento adquieren una permeabilidad secundaria. Por su posición estratigráfica, funcionan como transmisoras de agua a formaciones subyacentes.

En esta unidad se agrupan los conglomerados compuestos de rocas ígneas intrusivas-metamórficas y volcánicas, que sólo afloran en áreas pequeñas.

Se incluyen también los depósitos lacustres formados por estratos delgados de arena fina, intercalada con horizontes arcillosos.

### **Unidad Impermeable**

Dentro de esta unidad se encuentran las rocas metasedimentarias, intrusivas-metamórficas e intrusivas. De acuerdo con sus características litológicas y estructurales se consideran el basamento impermeable. Las rocas intrusivas que presentan alteraciones por meteorización y fracturamiento pueden almacenar pequeñas cantidades de agua.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

El acuífero es de **tipo libre**, se compone principalmente de sedimentos no consolidados a lo largo del cauce de los arroyos y en la zona de la planicie costera; es de granulometría fina a gruesa, desde arcillas a arenas, así como depósitos eólicos. Aunque no se explota, debajo de estos depósitos se aloja un medio fracturado conformado por la secuencia de areniscas y conglomerados, así como tobas y basaltos.

Durante el Pleistoceno los movimientos epirogénicos que sufrió la Península de Baja California, ocasionaron en el área la invasión del mar sobre la entonces cuenca en formación, como consecuencia al retirarse el mar originó la formación de salinas, que posteriormente fueron rellenadas por depósitos aluviales.

Actualmente estos depósitos salinos se encuentran representados por terrazas topográficas con elevaciones de hasta 80 msnm. Debido a las condiciones de formación de la cuenca, los pozos y norias perforadas en el valle captan agua con alto contenido en sales, lo cual restringe su aprovechamiento.

### **5.2 Parámetros hidráulicos**

Debido a que en el acuífero no se han ejecutado pruebas para determinar sus propiedades hidráulicas, no se conocen los valores de los parámetros hidrodinámicos.

Sin embargo por correlación hidrogeológica, se considera que son similares a las de los acuíferos San Simón, San Felipe, entre otros, dentro del estado de Baja California. Por ello, los valores de la transmisividad varían entre  **$1.5 \times 10^{-2}$  y  $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** .

### 5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento del acuífero se cuenta con información correspondiente al año 2007, en el que se tiene el registro piezométrico en dos aprovechamientos de agua subterránea; a partir de la medición de nivel estático en ellos se realizó una extrapolación apoyada con la línea de costa y la elevación topográfica del terreno.

### 5.4 Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en la zona que cuenta con información piezométrica, varía de 6 a 8 m en una franja de 2 km de ancho respecto de la línea de costa. A partir de esta franja hacia la costa la profundidad descende (figura 3).

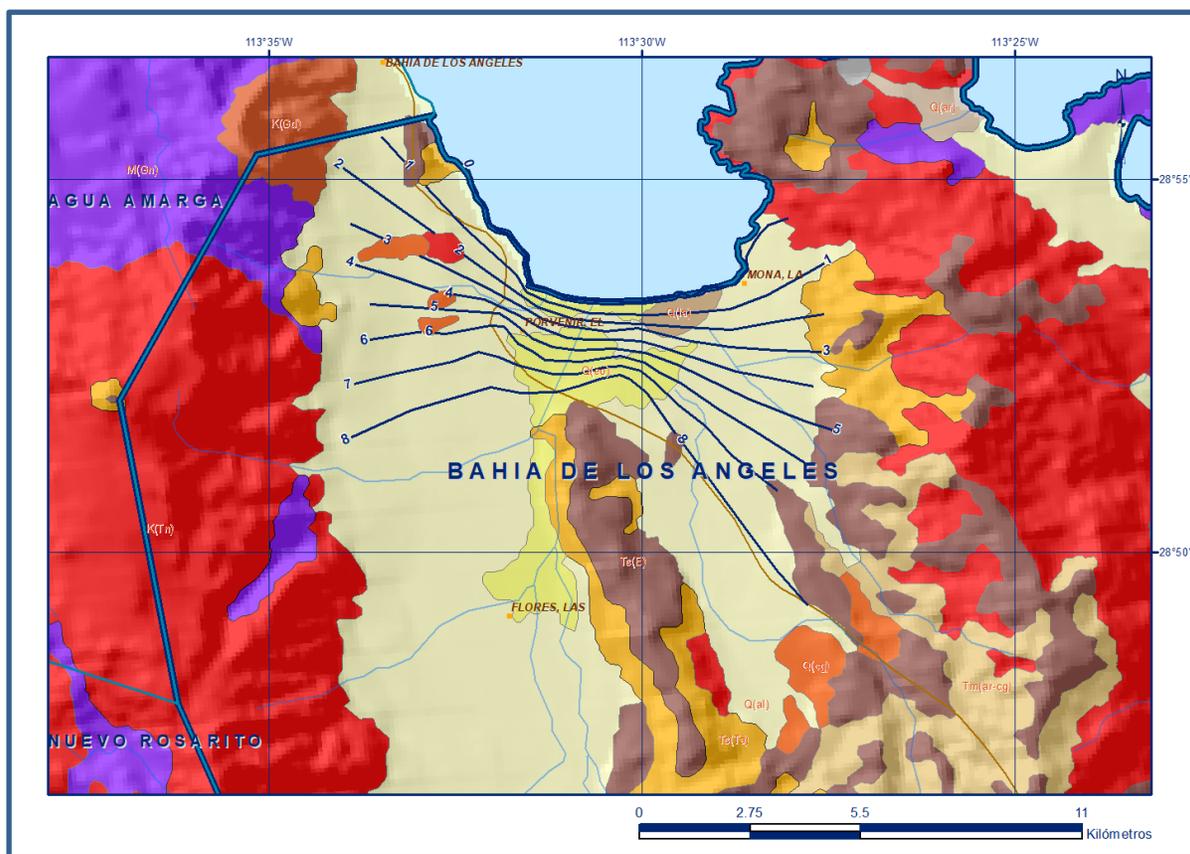


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2007)



Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo. El volumen de extracción es muy inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

### **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

No se cuenta con información hidrogeoquímica reciente; sin embargo, el primer estudio hidrogeológico realizado en la zona en el año 1974 reportó altas concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) en el agua subterránea. Los resultados de los análisis fisicoquímicos indican ya desde entonces altas concentraciones de salinidad que rebasan por mucho la norma de calidad para el agua destinada al consumo humano, con valores que variaban de 16,000 ppm de STD, registrados en la porción central del acuífero, hasta 20,000 ppm en la porción nororiental del valle, hacia la zona costera, a 13 km al Sur del poblado Bahía de Los Ángeles.

Desde el punto de vista geológico la salinidad se debe a los movimientos de transgresión y regresión que ocurrieron durante el periodo de formación de la cuenca, originando como consecuencia la formación de salinas, que posteriormente fueron cubiertas por depósitos sedimentarios.

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

Se ha estimado una extracción de **0.003 hm<sup>3</sup>/año** que corresponde a dos aprovechamientos que se localizan dentro del acuífero. El 91 % del volumen concesionado se destina para uso pecuario y el 9 % restante para uso doméstico.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recargas) y la suma total de las salidas (descargas), representa el volumen de agua perdido o ganado anualmente por el almacenamiento del acuífero.

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

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

Con base en la red de flujo inferida para el año 2007 y de acuerdo con la topografía y con el espesor de los depósitos aluviales que conforman el acuífero, se planteó el balance de aguas subterráneas en una superficie de 119 km<sup>2</sup>. Es importante señalar que los resultados del balance deben tomarse con mucha reserva debido a que ante la falta de información piezométrica es necesario hacer inferencias y estimaciones que permitan el cálculo de las componentes del balance. La ecuación de balance propuesta es la siguiente:

$$\text{Eh} + \text{Rv} - (\text{B} + \text{Sh} + \text{ETR}) = \pm \Delta\text{V(S)} \quad (1)$$

Dónde:

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

**Rv** = Recarga vertical por lluvia;

**B** = Extracción por bombeo;

**Sh** = Salidas por flujo subterráneo;

**ETR** = Salida por evapotranspiración;

**ΔV(S)** = Cambio de almacenamiento;

## 7.1 Entradas

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 ( $R_v$ ) 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 ( $R_i$ ), en este caso no se extrae agua subterránea para uso agrícola, debido a la mala calidad que presenta.

Por otra parte, no existen centros de población importantes por lo que la infiltración debida a las fugas en las redes de distribución de agua potable es insignificante, por lo que no se presenta recarga inducida, por lo que  **$R_i = 0$**

### 7.1.1 Recarga natural ( $R_v$ )

La recarga vertical se estimó considerando la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle, las infiltraciones a lo largo del cauce de los arroyos y de la recarga por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ ) que se presenta a través de las zonas de pie de monte. La recarga vertical por efecto de la lluvia se seleccionó como incógnita en la ecuación de balance de agua subterránea.

Por lo tanto su estimación se efectuó a partir de la ecuación de balance (1) de la siguiente manera.

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ )

La estimación de esta componente se realizó utilizando la configuración de la elevación del nivel estático inferida para el año 2007, en la cual se definieron las direcciones y celdas de flujo que junto con la transmisividad y gradiente hidráulico, delimitaron los caudales que circulan en el acuífero (figura 4).

La componente de flujo subterráneo se calculó para el año 2007 (tabla 2), Con base en la configuración inferida, se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga subterráneamente al acuífero mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

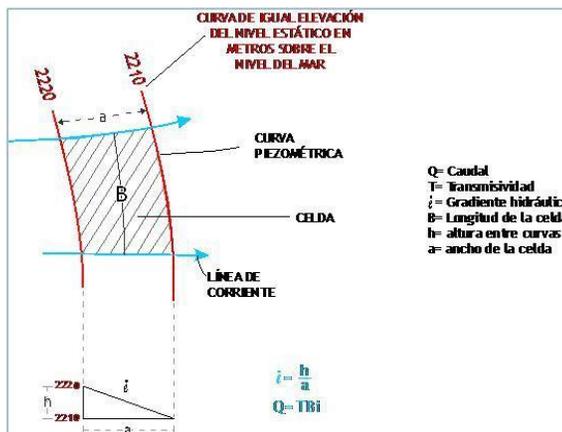
Donde:

**Q** = Gasto;

**T** = Transmisividad;

**B** = Longitud de la celda;

**I** = Gradiente hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero (tabla 2).

Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2007

Celda	T	B	i	Q1	Vol <sub>1</sub> anual
	(10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)	(10 <sup>3</sup> m)		(m <sup>3</sup> /s)	(hm <sup>3</sup> año)
<b>ENTRADAS LATERALES</b>					
<b>E<sub>1</sub></b>	4.051	4.0	0.002	0.0324	1.0

El volumen estimado de las entradas por flujo subterráneo es de **1.0 hm<sup>3</sup>/año**.

## 7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre principalmente por evapotranspiración (ETR), salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y bombeo (B).

### 7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este componente se representa por la descarga de un acuífero hacia la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación que existe.

Debido a que los valores de la precipitación media anual son muy bajos, la aplicación de los métodos empíricos para estimar ETR se invalida, ya que éstos son aplicables en regiones con valores mayores a los 300 mm.

Debido a la influencia del ascenso capilar y considerando en el área una profundidad al nivel estático menor a 3 m, se considera presente el fenómeno de evapotranspiración.

Para la cuantificación de este parámetro se utilizó la relación empírica de Gardner y Fireman (1958), la cual determina la tasa máxima de evaporación, a partir de las propiedades hidráulicas del medio y su granulometría. Su expresión matemática es:

$$E = Ks \left[ \frac{-a\pi}{LN(\text{sen}(\pi / N))} \right]^N$$

Dónde:

**Ks** = Conductividad Hidráulica a Saturación [cm/día];

**a** y **N**= Parámetros que representan la forma del suelo; a [cm] y N [1];

**L** = Profundidad [cm];

Los parámetros **a** y **N** seleccionados de acuerdo a las características descritas arriba, son: **a= -16 cm** y **N = 3.7**, mientras que **Ks = 20 cm/día**. Con estos parámetros se construye la gráfica para la relación tasa máxima de evaporación–profundidad de influencia (figura 6).

Tabla 3. Volumen de evapotranspiración de acuerdo al área

Prof. media al nivel estatico (cm)	Área (km <sup>2</sup> )	Tasa de evapotranspiracion (mm/día)	Volumen de evap. (hm <sup>3</sup> /año)
<b>2007</b>			
100	2.8	0.36	0.37
200	0.5	0.03	0.01
300	0.5	0.01	0
EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL			<b>0.38</b>

De acuerdo con esto, el volumen estimado de evapotranspiración para el año 2007 fue de **0.4 hm<sup>3</sup>/año**.

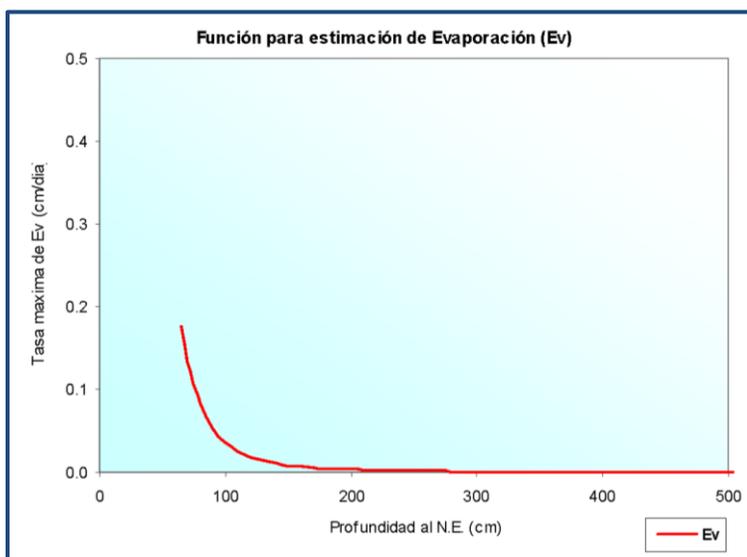


Figura 6. Relación de la tasa máxima de evaporación y profundidad de influencia

### 7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **0.003 hm<sup>3</sup>/año**.

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

Para calcular el volumen que se descarga naturalmente del área de balance por flujo subterráneo, se consideró la configuración que se infirió para el 2007. Las salidas por flujo subterráneo son hacia el mar.

Se determinaron en cinco celdas a lo largo de la costa y se cuantificaron de la misma manera que las entradas, los valores se muestran en la tabla 4. Para el año 2007, se determinó un volumen de salida subterránea de 0.681 hm<sup>3</sup>/año. Para fines del balance se considerará un valor redondeado de **Sh = 0.7 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ )

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático.

Debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de

abatimiento. Por lo que se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo que para fines del balance se considera nulo,  $\Delta V(S) = 0$ .

Tabla 4. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2007

Celda	T ( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )	B ( $10^3 \text{ m}$ )	i	Q1 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Vol, anual ( $\text{hm}^3$ )
<b>SALIDAS SUBTERRÁNEAS</b>					
S <sub>1</sub>	1.389	1.87	0.0014	0.0036	0.115
S <sub>2</sub>	0.926	1.68	0.0018	0.0028	0.088
S <sub>3</sub>	0.926	2.26	0.0024	0.005	0.159
S <sub>4</sub>	0.926	2.21	0.0028	0.0057	0.181
S <sub>5</sub>	0.926	2.78	0.0017	0.0044	0.138
<i>TOTAL DE SALIDAS SUBTERRÁNEAS</i>					<b>0.681</b>

#### Solución de la ecuación de balance:

Sustituyendo los valores en la ecuación de balance en la expresión (2), obtenemos lo siguiente:

$$Rv = \Delta V(S) + (B + Sh + ETR) - Eh \quad (2)$$

$$Rv = 0.0 + (0.003 + 0.7 + 0.4) - 1.0$$

$$Rv = 0.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = Rv + Eh$$

$$R = 0.1 + 1.0$$

$$R = 1.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

Donde:

**DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **1.1 hm<sup>3</sup>/año**, todos ellos son de recarga natural.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida 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 (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 **506,165 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 1.1 - 0.0 - 0.506165 \\ \text{DMA} &= 0.593835 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **593,835 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua. 2007. Estudio Técnico para Determinar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Subterráneas de los acuíferos El Rosario, Villa de Jesús María, Bahía de Los Ángeles, La Rumorosa-Tecate y San Rafael-La Palma, estado de Baja California”.Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1974. Apreciación Preliminar de las Características Hidrogeológicas del Valle de Bahía de Los Ángeles en el Estado de Baja California. Técnicas Modernas de Ingeniería S. A.