



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO EL SOCORRO (0247), 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>4</b>
3.1 Provincia fisiográfica.....	4
3.2 Clima.....	5
3.3 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	7
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
4.1 Estratigrafía.....	8
4.2 Geología estructural.....	9
4.3 Geología del subsuelo.....	9
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	10
5.2 Parámetros hidráulicos.....	10
5.3 Piezometría.....	11
5.4 Comportamiento hidráulico.....	11
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	11
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	12
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	13
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	13
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>14</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>14</b>
7.1 Entradas.....	15
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	16
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	16
7.2 Salidas.....	18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	18
7.2.2 Bombeo (B).....	19
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	19
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	20
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>21</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	21
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 El Socorro, definido con la clave 0247 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro occidental del estado de Baja California, en la costa del Océano Pacífico (figura 1). Se ubica entre los paralelos 30° 03' 0.6" y 30° 23' 28.7" de latitud norte y entre los meridianos 115° 29' 56.2" y 115° 47' 14.6 de longitud oeste. Colinda al suroeste con el acuífero El Rosario, al noreste con San Simón y Valle Chico-San Pedro Mártir, al este con el acuífero Matomí-Puertecitos. Geopolíticamente se ubica en el municipio de Ensenada, Baja California a unos 240 km al sur de la cabecera municipal y tiene una superficie de 608 km<sup>2</sup>. Las principales poblaciones dentro del acuífero El Socorro son, Ejido Valle Tranquilo, El Campito, Campo Viejo, El Canuto.



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

ACUÍFERO 0247 EL SOCORRO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	34	34.3	30	22	8.9	
2	115	29	56.2	30	22	8.0	
3	115	33	45.0	30	19	48.2	
4	115	37	26.3	30	15	16.2	
5	115	40	0.1	30	8	41.0	
6	115	45	20.4	30	3	52.6	
7	115	47	14.6	30	3	0.3	DEL 7 AL 8 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
8	115	50	14	30	20	22.0	
9	115	44	8.3	30	20	52.8	
10	115	37	8.9	30	23	28.7	
1	115	34	34.3	30	22	8.9	

## **1.2 Situación administrativa del acuífero**

El acuífero San Fernando-San Agustín 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 el 15 de mayo de 1965.

Clasificado 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, que explota el 89% del volumen tanto de agua dulce como salobre. Desde el año 2004 se constituyó el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) en el acuífero.

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

En la superficie que cubre el acuífero no se han llevado a cabo estudios geohidrológicos, por lo que el presente trabajo, se realizó con los datos obtenidos del recorrido de campo, así como la consulta de documentación del INEGI, SIGMAS, CONABIO entre otros.

## **3. FISIOGRAFÍA**

### **3.1 Provincia fisiográfica**

El acuífero pertenece a la Provincia Fisiográfica de Baja California (Raisz, 1964), subprovincia Sierra de Juárez. Esta última se considera la continuación meridional del Complejo Cristalino de la Sierra Nevada que aflora en California (USA) y se caracteriza por ser una gran masa de rocas graníticas limitada al este por un corte repentino (constituyendo probablemente un escarpe de falla) hacia la depresión Saltón (E. López Ramos, 1979).

En términos generales la Sierra de Juárez puede describirse como una gran faja elevada, inclinada hacia el oeste, dividida en una serie de cadenas montañosas paralelas que incluyen a las sierras San Jacinto y Santa Rosa en California (USA), y las sierras Juárez y San Pedro Mártir en Baja California.

La Provincia Fisiográfica de Baja California está limitada al norte por las Sierras Transversales de la Alta California (Bailey y Johns, 1954); hacia el este por las depresiones Saltón, San Felipe-Tiburón y Hermosillo-Guaymas, que yacen en el Golfo de California; hacia el noroeste por la provincia fisiográfica Continental Borderland (Emery, 1941); al oeste por los restos de las rocas metamórficas de las islas Cedros, San Andrés, Magdalena y Santa Margarita (en el Océano Pacífico); y hacia el suroeste con la provincia fisiográfica de Sierras en la Plataforma Marina de Baja California (Sea Mount Province) (E. López Ramos, 1979).

En la porción septentrional de la Sierra de Juárez, entre su elevación promedio de 1660 msnm y la costa del Océano Pacífico –variando ésta última en el rango de 30 a 700 m debido a la presencia de acantilados-, la topografía accidentada presenta mesetas cuya altitud desciende al occidente, entre las cuales se forman algunos valles de reducida extensión, cuya altitud fluctúa entre los 2100 y 300 msnm. Entre éstos, podemos mencionar los valles de Las Palmas, San Rafael, Ojos Negros, Real del Castillo, Álamo, Santa Trinidad y La Encantada; todos ellos drenados por arroyos que generalmente transcurren por profundos y estrechos cañones.

En la cuenca a la que pertenece el acuífero El Socorro la zona montañosa presenta algunos de los rasgos morfológicos de la Sierra de Juárez pues pertenece a la parte final de la misma, modelada en un sistema de grandes bloques afallados producidos, primero por la intrusión del batolito peninsular durante el Cretácico Medio (F. Mina, 1957) y posteriormente por el periodo de grandes fallamientos del Pleistoceno (C. Beal, 1948). La franja costera presenta una terraza marina del Cretácico y del Paleógeno-Neógeno que emergió durante el Cuaternario.

### **3.2 Clima**

Con base en la nomenclatura propuesta por Köppen modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones de México, el área presenta climas muy áridos o secos BW, con lluvias en verano, invierno y escasas todo el año; en las zonas costeras de la Península de Baja California se presentan los climas de subtipos muy secos, muy cálidos y cálidos  $BW(h')hw(x')$ , muy secos templados  $BWKw(x')$  y muy secos semicálidos  $BWhw(x')$ . En el noroeste de la Península el clima es seco BSo, con lluvias en invierno y secos mediterráneos templados BSKs y BSKs ( $x'$ ) en la porción central y noroeste.

De acuerdo con los registros de la estación 015 El Socorro, la temperatura media anual es de 16.3° C, la temperatura máxima de 24.6° C y la mínima de 6.9° C. La lámina de evaporación media anual es de 1,373 mm y varía de 362.8 mm a 1,676 mm al año. El valle El Socorro presentó una precipitación anual muy variable desde el año que tiene registro la estación climatológica, el año en que se registró la mayor precipitación total anual fue 1965 con un valor de 707.4 mm, en tanto que el año en que se registró la menor precipitación total anual fue 2007 con un valor de 8 mm; la precipitación media anual es de 127.1 mm.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se encuentra dentro de la Región Hidrológica 1, que comprende algunas corrientes de carácter internacional y en ella se encuentran dos de las ciudades más importantes del estado: Tijuana y Ensenada. Las corrientes de esta región desembocan en las costas del Océano Pacífico.

El acuífero queda ubicado dentro de la cuenca Arroyo Escopeta-Cañón San Fernando. A esta cuenca pertenecen el arroyo Escopeta, de poca importancia y el Cañón de San Fernando, que marca el límite sur de la región hidrológica. Este cañón es el único evento orohidrográfico de la cuenca, pero sólo en raras ocasiones lleva agua. El cauce principal del arroyo Escopeta tiene en general una dirección Este-Oeste con una longitud máxima de 115 km. En el tramo medio de su recorrido pasa por La Misión de San Fernando y tiene como subcuencas intermedias el Cañón de San Fernando, Cañón de San Vicente, Arroyo del Rosario, Arroyo del Socorro, Arroyo San Simón y Arroyo de la Escopeta.

Los escurrimientos presentan un patrón de drenaje que fluctúa de dendrítico, a subparalelo. El arroyo El Socorro es uno de los últimos escurrimientos dentro de la Región Hidrológica 1; tiene origen en las mesas de Las Tinajas, Mesa Blanca, Pico Matomi y Cerro de San Juan de Dios; que forman parte de la sierra San Pedro Mártir, es alimentado por otros afluentes orientados en general al suroeste, de los cuales puede mencionarse el Arroyo San Antonio, Arroyo Grande, Las Cruces Aguajito, Sauce y San Juan de Dios.

El arroyo El Socorro pasa en su recorrido por el poblado El Canuto y su cuenca tiene una superficie de 608.03 km<sup>2</sup> hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

### **3.4 Geomorfología**

El acuífero se encuentra en una zona con un relieve irregular en el que se observan pendientes que varían entre el 28% y 10% de inclinación, con un contraste topográfico de suave a sinuoso. La sierra de San Pedro Mártir está formada por cuerpos intrusivos de composición ácida al igual que el Batolito Peninsular, dando origen a prominencias topográficas.

A lo largo del arroyo El Socorro hay presencia de terrazas aluviales; se presentan con espesores mayores en la porción central del arroyo en la margen izquierda, cerca de la comunidad El Canuto y hacia la desembocadura del arroyo, con espesores de 8 a 10 m.

En la parte cercana a la costa hacia el Suroeste se observa un grupo de depósitos de areniscas consolidadas y en algunas partes se observa la presencia de una veta de yeso selenita de 1 a 2 cm aproximadamente intercalada con las areniscas, la erosión de las areniscas da origen a pequeñas cavernas estas se observan en las zonas cercadas a la costa.

El drenaje que se presenta en la zona es paralelo en la zona norte donde se observa el arroyo El Socorro su drenaje es paralelo, y dendrítico en la porción Este, en la que nacen los arroyos de El Socorro, El Pedregoso los cuales constituyen la principal fuente de recarga de la zona, ambos son de escaso desarrollo y su longitud es de aproximadamente 25 km.

## **4. GEOLOGÍA**

El acuífero está constituido principalmente por rocas ígneas extrusivas y sedimentarias, figura 2. Su origen ha dado como resultado la formación de diferentes unidades geológicas, las cuales están constituidas por conglomerados, areniscas y lutitas, areniscas de material carbonoso (presentes en capas delgadas que van de los 5 a 20 cm) a lo largo del arroyo y los cuales pertenecen a la Formación el Rosario.

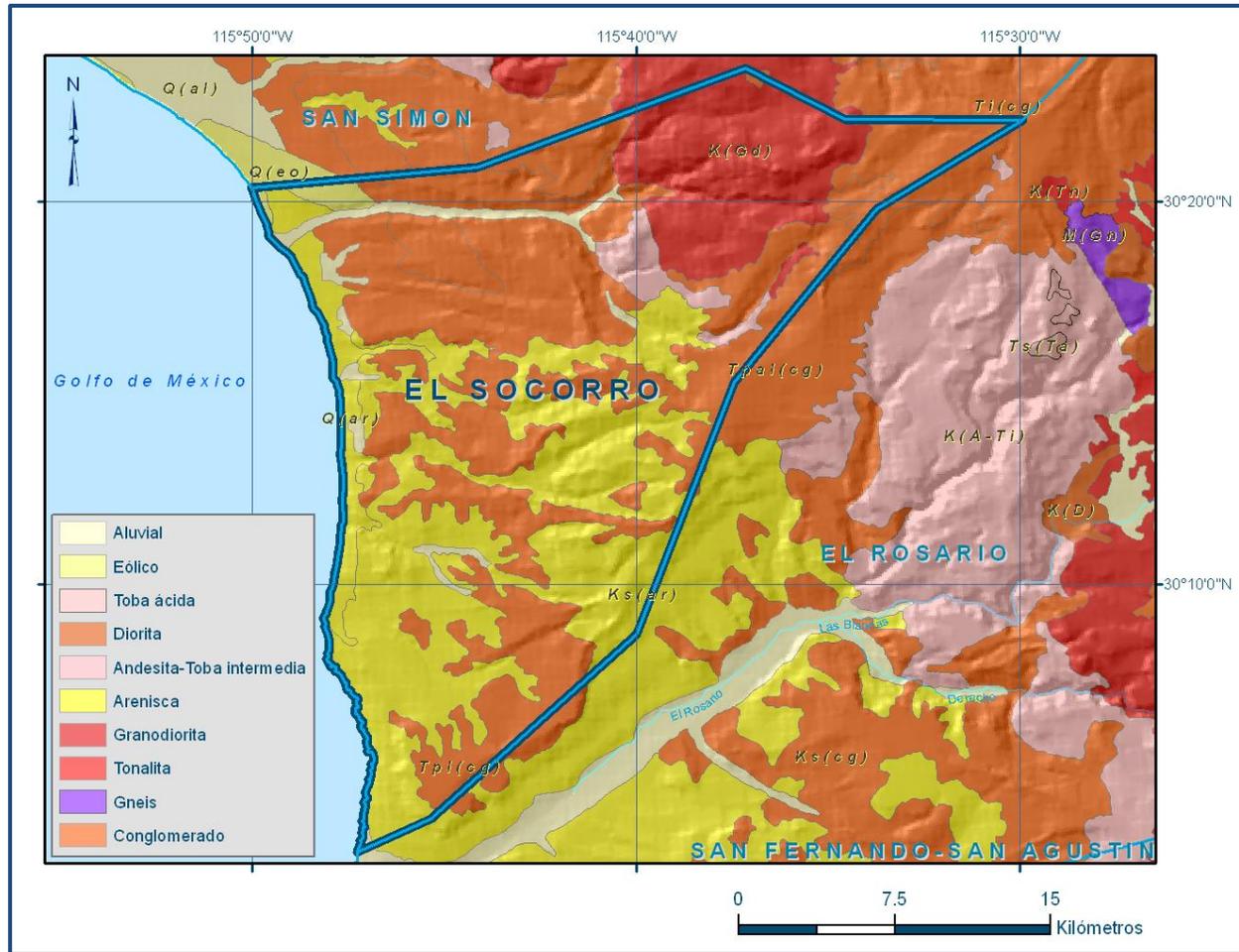


Figura 2. Geología general del acuífero

#### 4.1 Estratigrafía

**Formación Rosario (Kr):** constituida por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados poco consolidados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación aflora en la parte central del arroyo, descansa en discordancia angular sobre la Formación Alisitos.

**Formación Sepultura (Kr-Tr):** Es un conjunto de areniscas y conglomerados de origen marino en su base y de tipo continental en la cima. La parte inferior está en contacto con la Formación Rosario de manera concordante y transicional. Su espesor es de 400 m aproximadamente, su edad va del Eoceno Inferior al Paleoceno. Morfológicamente forma lomeríos suaves de poca altura. Se encuentra distribuida en la porción noroccidental y occidental de la Península.

**Formación Alisitos (Kas, Kav):** constituida por una serie de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias; las rocas volcánicas tienen una composición dacítica-andesítica; las rocas sedimentarias son producto de la denudación de las rocas volcánicas y volcanoclásticas. Esta formación está afectada por el proceso de dinamometamorfismo, el cual disminuye de este a oeste.

Correspondiente al Paleógeno. La presencia de esta formación se observa en las partes altas que circundan al valle.

**Aluvión (Qal):** Los depósitos cuaternarios fluviales y aluviales que afloran y conforman el relleno a lo largo de los cauces. Desde el punto de vista geohidrológico, estos depósitos son de gran importancia, ya que son capaces de proporcionar volúmenes considerables de agua subterránea, susceptibles de ser aprovechados. Existe también la presencia de depósitos marinos, los cuales se observan formando terrazas costeras, constituidas de arenas de grano fino a muy fino con alto contenido de cuarzo, en la parte media del acuífero.

#### **4.2 Geología estructural**

Las estructuras que afectan las unidades litológicas son principalmente: fracturamiento, fallamiento y plegamiento en rocas sedimentarias. Las fallas son principalmente de tipo normal, cuya representación fisiográfica es la sierra de San Pedro Mártir; existen algunas fallas de desplazamiento horizontal, representada por la Cañada Seis Hermanos.

De acuerdo con las rocas que son afectadas por el fallamiento, se considera que las estructuras son de edad pre-miocénica, con sentidos de movimiento horizontal (izquierdo) para el primer sistema de esfuerzos y de tipo vertical (normal), principalmente para el sistema post-miocénico.

#### **4.3 Geología del subsuelo**

Debido a que el acuífero no cuenta con información, se delimitaron las unidades hidroestratigráficas de acuerdo al recorrido de campo que se realizó a lo largo del acuífero, y comparándolo en ocasiones con los acuíferos cercanos que presentan características similares. Se obtuvieron 3 unidades geohidrológicas que de la base a la cima están agrupadas como:

**Unidad Impermeable:** representada por rocas ígneas como gabro, granito y rocas volcánicas plutónicas, así como por rocas sedimentarias como areniscas y lutitas de la Formación Rosario, dicha formación se localiza en las partes altas de la cuenca en las sierras que circundan al valle limitándose lateralmente y a profundidad.

**Unidad Semipermeable:** la constituyen conglomerados poco consolidados, depósitos fluviales y rocas volcánicas extrusivas del Paleógeno-Neógeno de origen continental y por conglomerados de la Formación Rosario. Debido a su distribución localizada principalmente al oriente en la parte alta de la cuenca, se reduce su importancia geohidrológica.

**Unidad Permeable:** está constituida por depósitos granulares del Cuaternario, integrado por gravas, arenas y material arcillo-arenoso originados por la erosión de formaciones preexistentes, transportadas de las partes altas de la cuenca, por las corrientes a las zonas topográficamente bajas, en las que se ubica la zona de explotación.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

Se trata de un acuífero libre integrado por un medio granular conformado por los depósitos granulares no consolidados, arenas de granulometría media a gruesa en las partes altas y de media a fina en las zonas de desembocadura, gravas y material arcillo-arenosos de porosidad primaria y por un medio fracturado constituido por rocas ígneas como gabro y basalto fracturados y fallados. Se observan como una serie de horizontes de permeabilidad variable, todos éstos con diferentes espesores y continuidad lateral.

El acuífero está limitado a profundidad y lateralmente por la presencia de rocas intrusivas que funcionan como basamento impermeable y que favorecen el escurrimiento superficial hacia zonas de mayor permeabilidad donde se infiltra.

### **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 vecinos, dentro del estado de Baja California, ya que presentan características geológicas e hidrogeológicas similares.

Tomando en consideración lo anterior para este acuífero se utilizaron los datos generados en la perforación exploratoria de los pozos (PBCER-1 y PBCER-2) localizados en el acuífero El Rosario (tabla 2):

Tabla 2. Estimación de parámetros hidráulicos

PBCR-1		PBCR-2	
NE (m)	16.28	NE (m)	15
ND (m)	29.15	ND (m)	21.58
Q (lps)	5	Q (lps)	36
B (m)	28	B (m)	31
K(m/s)promedio		T(cm <sup>2</sup> /s)promedio	
(PBCR-1) 1.39 X 10 <sup>-4</sup>		(PBCR-1) 6.94 X 10 <sup>-3</sup>	
(PBCR-2) 9.25 X 10 <sup>-5</sup>		(PBCR-2) 9.26 X 10 <sup>-3</sup>	

Mientras que el coeficiente de almacenamiento de **0.05**, se tomó del estudio realizado en 1990 por la CNA Gerencia Estatal en Baja California, en el estudio “Actualización Piezométrica y Geoquímica del valle El Rosario municipio de Ensenada, B.C”.

### 5.3 Piezometría

En el área que cubre el acuífero no existe historial piezométrico. Sólo para el mes de noviembre de 2008, se tiene el registro piezométrico de los aprovechamientos a los cuales se pudo tener acceso, con los datos obtenidos se realizaron las configuraciones para determinar el comportamiento hidráulico en las que debido a la información obtenida se procedió a realizar una extrapolación de la elevación del nivel estático apoyado con el límite del nivel del mar (línea de costa).

### 5.4 Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

Para octubre del 2008, la profundidad al nivel estático varía de 1 a 34 m. Las profundidades menores se observan en el área de explotación que comprende al arroyo el Socorro desde el poblado el Canuto observándose además flujo base en el área cercana a la carretera Transpenínsula, mientras que las mayores profundidades

se localizan al suroeste del acuífero, en las partes altas de otra pequeña área que corresponde al área de explotación 2, estas profundidades se relacionan con la topografía y el material perforado para poder localizar el flujo de agua (figura 3).

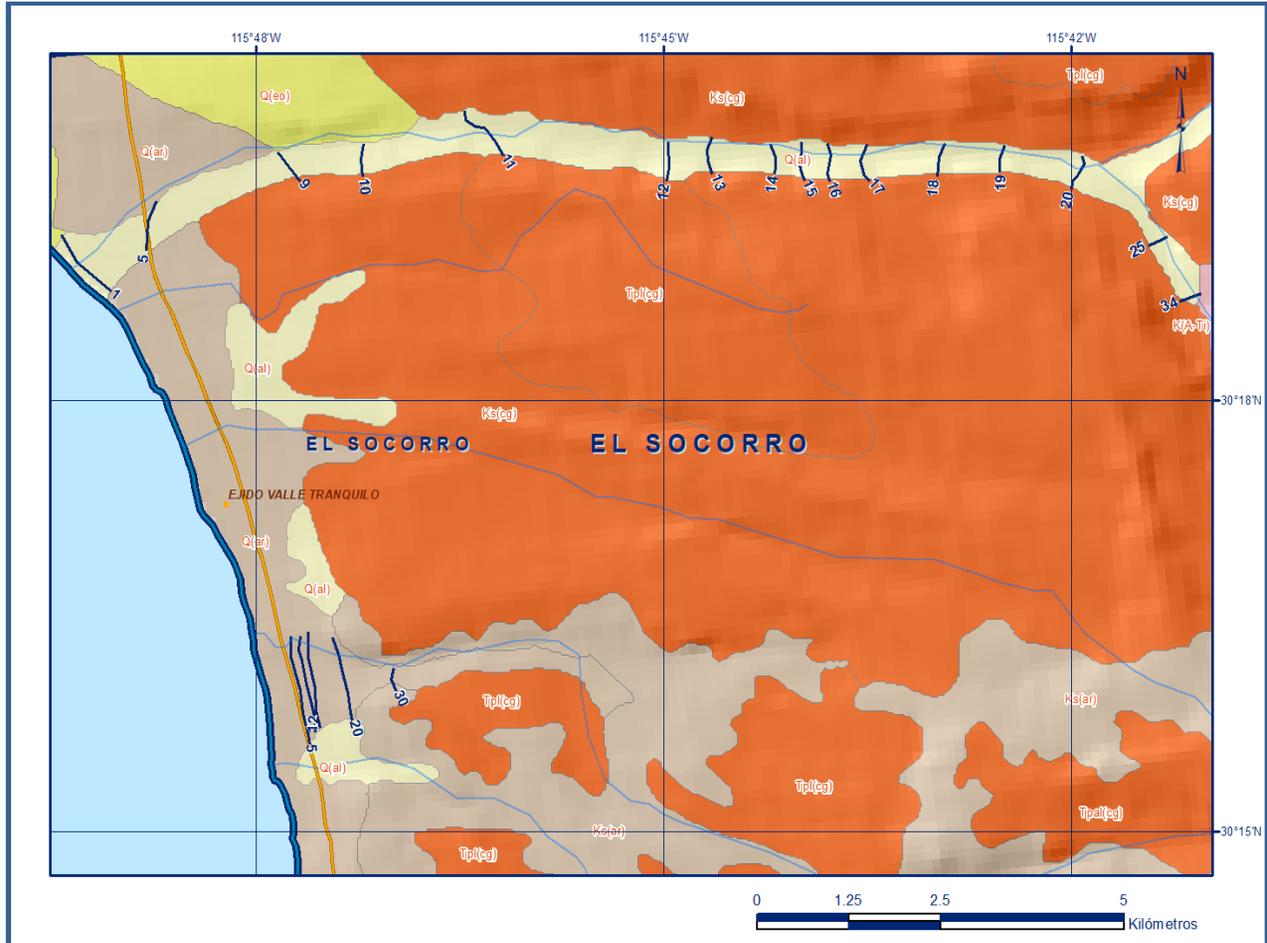


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008). Área de explotación 1 Y 2

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Es el principal indicador del flujo subterráneo, si las cargas están referidas a la elevación media del nivel del mar.

De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación generan el movimiento del agua subterránea en dirección de las localidades donde la elevación de los niveles de saturación es menor, todo esto si no existen fronteras que impidan el flujo.

De este modo se observa que las configuraciones de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 4) se comportan de forma decreciente donde la dirección del flujo subterráneo es de Este a Suroeste ligeramente existiendo salidas por flujo subterráneo hacia el Océano Pacífico a lo largo de la línea de costa.

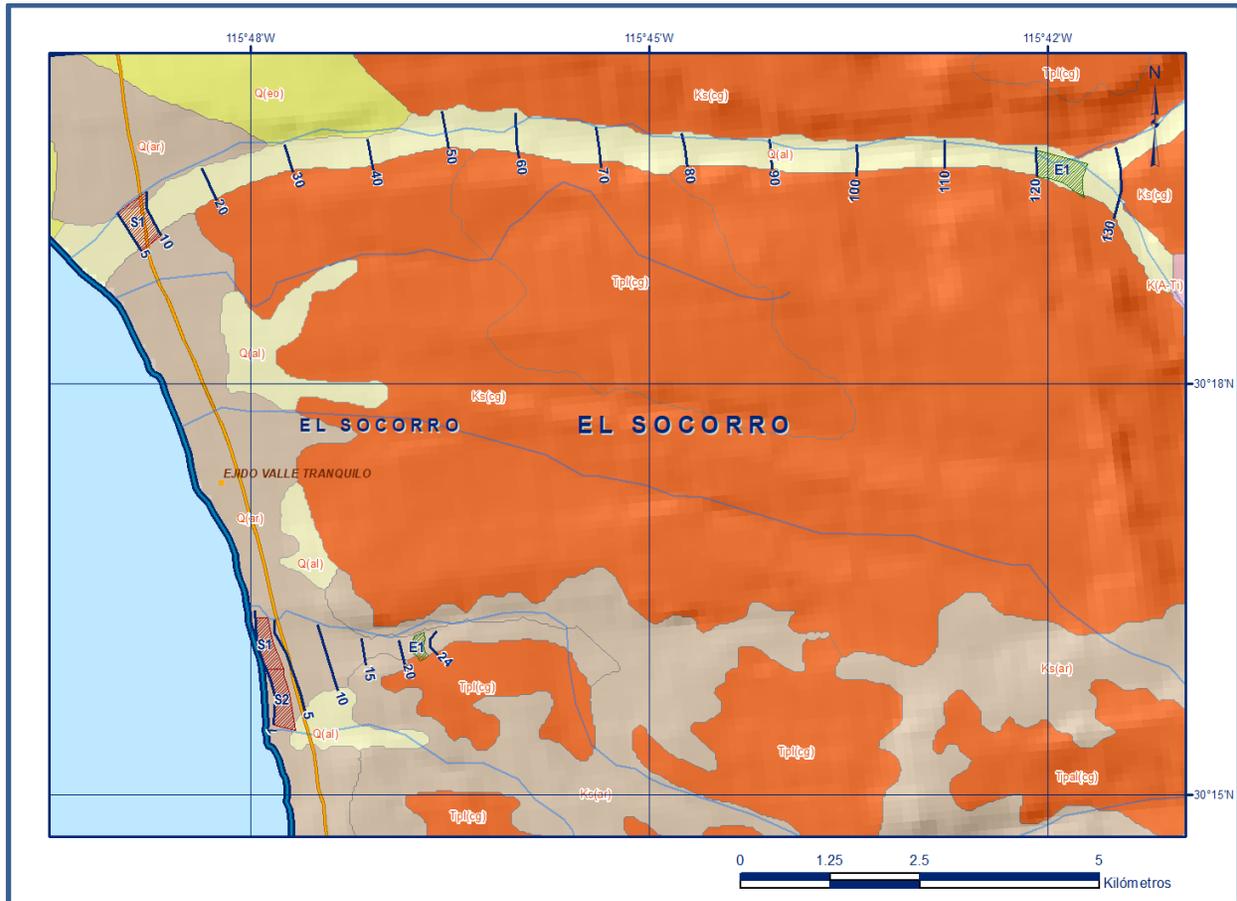


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008). Área de explotación 1 y 2

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Debido a que para el acuífero no existe información anterior no se llevó a cabo un plano de evolución, infiriendo que aunque en la zona no existen demasiados aprovechamientos el flujo de agua se mantiene en equilibrio, disminuyendo en temporadas de sequía, considerando así que los niveles de agua se vuelven a recuperar.

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo al recorrido realizado en el mes de octubre del 2008, con el fin de obtener los niveles piezométricos en algunos de los pozos localizados dentro del área acuífera

para poder realizar un balance de aguas subterráneas y con ello determinar la disponibilidad de aguas subterráneas, se tomaron los parámetros de CE y temperatura, para determinar en forma general la calidad del agua de los cuales se obtuvo que la Conductividad Eléctrica (CE) varía entre 1.68 y 2.31, (1075 a 1478 ppm aproximadamente), la temperatura (T°C) varía de 21.5° C en la zona cercana a la costa a 23.6° C en la parte alta. Las menores concentraciones de Sólidos Totales Disueltos se localizan en la parte alta del acuífero, mientras que las mayores concentraciones se localizan hacia las partes cercanas a la costa.

Se considera entonces que el agua es de buena calidad para los usos agrícola, doméstico, industrial y pecuario.

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

El REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) manifiesta la existencia de 39 aprovechamientos, de los cuales 11 se encuentran en el área de explotación 1, y 8 en el área de explotación 2, los 21 pozos que en el REPDA se reportan dentro de este acuífero, en realidad corresponden respecto a las coordenadas al Acuífero San Simón que colinda al Norte del Acuífero El Socorro, considerando entonces que el volumen concesionado para el acuífero El Socorro se obtuvo de que el 3% (0.004953 hm<sup>3</sup>) el volumen es para uso Pecuario, 2% (0.003302 hm<sup>3</sup>) para Doméstico, 3% (0.004953 hm<sup>3</sup>) para uso Público Urbano, 3% (0.004953 hm<sup>3</sup>) Servicios y el 89% (0.146939 hm<sup>3</sup>) para uso Público Urbano siendo este el de mayor consumo, y dando como resultado una extracción total de **0.165100 hm<sup>3</sup>** de agua.

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

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo únicamente para el año 2008, en una superficie de 8.8 km<sup>2</sup>, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

Esta área se divide en dos regiones, la primera corresponde a la parte más alta y se localiza al este del arroyo, geológicamente constituida por rocas ígneas extrusivas y sedimentarias con espesores de 20 a 65 m, mientras que al Suroeste, en el área cercana a la costa el depósito de sedimentos presenta espesores de 20 a 80 m, formando algunas terrazas.

El área de explotación 1 es de aproximadamente 7.03 km<sup>2</sup> mientras que el área de explotación 2 la superficie es de 1.82 km<sup>2</sup>.

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.

De acuerdo con la información confiable disponible se realizó el balance geohidrológico para el Año 2008. Cada componente del balance se cuantificó a partir de los valores medios. La incógnita seleccionada fue la recarga vertical.

Las salidas del acuífero El Socorro son por flujo subterráneo hacia el Océano Pacífico a lo largo de la línea de costa, el bombeo y la evapotranspiración. Las entradas al área de balance corresponden a las entradas subterráneas provenientes del oriente y la recarga por lluvia directa en el valle.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica:

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

## **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 de los arroyos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente 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, el riego agrícola es incipiente y utiliza sistema tecnificado, 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:

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

Donde:

**$R_v$** : Recarga vertical

**$E_h$** : Entradas por flujo horizontal

**$B$** : Bombeo

**$S_h$** : Salidas por flujo horizontal

**$ETR$** : Evapotranspiración real

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área 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, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 4). De acuerdo con la ecuación de Darcy tenemos que:

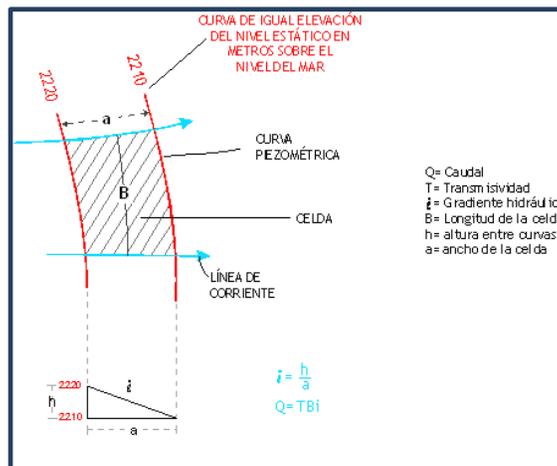
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

**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. El cálculo del flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 es de 0.707 hm<sup>3</sup> para el área de explotación 1 y para el área de explotación 2 se considera 0.833 hm<sup>3</sup> (tablas 2 y 3).

Tabla 3. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008 Para el área de explotación 1

Celda	T (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)	Longitud B (m)	i	Caudal Q (m <sup>3</sup> /s)	Volumen anual (hm <sup>3</sup> )
E1	6.944	401	0.00805	0.0224	0.707

Tabla 4. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008. Para el área de explotación 2

Celda	T (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)	Longitud B (m)	i	Caudal Q (m <sup>3</sup> /s)	Volumen anual (hm <sup>3</sup> )
E1	9.028	296	0.0099	0.0264	0.833

Para el año 2008 la sumatoria del volumen de entrada por flujo subterráneo horizontal en las 2 áreas de explotación es de **1.5 hm<sup>3</sup>**.

## 7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre por flujo subterráneo hacia el mar (Sh), evapotranspiración (ETR) y bombeo de los aprovechamientos de agua subterránea (B).

### 7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración corresponde a 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. Debido a los bajos volúmenes de precipitación que se presentan en el área de balance se decidió descartar tanto el método de Turc como el de Smith para el cálculo de la evapotranspiración, ya que para considerar confiables los resultados la precipitación debe ser mayor a 320 y 300 mm respectivamente. Para la cuantificación del volumen de evapotranspiración se utilizó la relación empírica de Gardner y Fireman (1958), que determina la tasa máxima de evaporación, a partir de las propiedades hidráulicas del medio y su granulometría. Su expresión matemática es:

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

Donde:

**K<sub>s</sub>**= Conductividad Hidráulica a Saturación (cm/día)

**a** y **N**= Parámetros que representan la forma del suelo (a (cm) y N (adim)).

**L**= Profundidad (cm)

El área presenta una granulometría que varía de media a gruesa, conformada por arenas y cantos rodados arrastrados a lo largo del arroyo. En la parte media al suroeste del arroyo es más abundante la cantidad de material fino. Los parámetros a y N seleccionados de acuerdo a las características descritas arriba, son de a = -18 cm y N = 3.8, mientras que K<sub>s</sub> = 35 cm/día. Con estos parámetros se construye la gráfica para la relación tasa máxima de evaporación-profundidad de influencia (figura 5 y tabla 5).

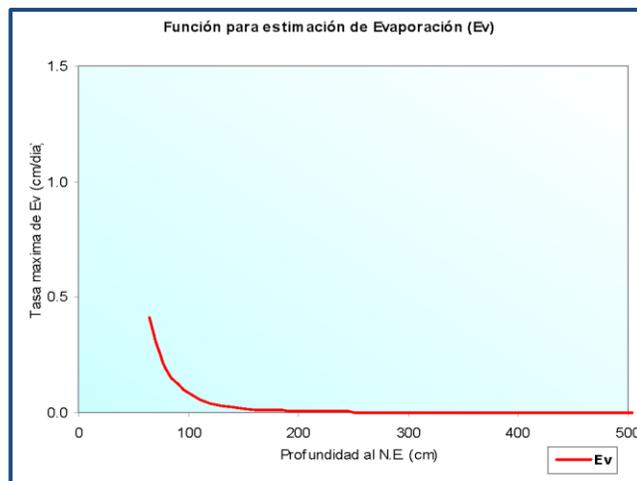


Figura 5. Relación de la tasa máxima de evaporación y profundidad de influencia

Tabla 5. Volumen de evapotranspiración de acuerdo al área

Prof. media al nivel estatico (cm)	Area (km <sup>2</sup> )	Tasa de evap. (mm/día)	Volumen de evap. (hm <sup>3</sup> )
<b>ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (2008)</b>			
100	0.77	0.81	0.226
200	0.68	0.06	0.014
300	0.69	0.01	0.003
<b>ÁREA DE EXPLOTACIÓN 2 (2008)</b>			
100	0.07	0.81	0.02
200	0.066	0.06	0.001
300	0.063	0.01	0

La salida del acuífero por evapotranspiración para el área de explotación 1 fue de 0.243 hm<sup>3</sup>/año y para el área de explotación 2 de 0.021 hm<sup>3</sup>/año para el año 2008 el volumen descargado por evapotranspiración (ETR) **es de 0.2 hm<sup>3</sup>**, que corresponde a la sumatoria del volumen de evapotranspiración en las dos áreas de explotación dentro del acuífero.

### 7.2.2 Bombeo (B)

De acuerdo al apartado de Censo de aprovechamientos, el volumen reportado de extracción por bombeo es de **0.2 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 consideraron la transmisividad y las configuraciones de elevación al nivel estático para los años de análisis. Las salidas por flujo subterráneo ocurren hacia el mar, se cuantificaron aplicando la Ley de Darcy, tablas 7 y 8.

Tabla 7. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008. Para El Área de Explotación 1

Celda	T ( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Longitud B (m)	i	Caudal Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Volumen anual ( $\text{hm}^3$ )
S1	1.736	569	0.013	0.0128	0.404

Tabla 8. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008 Para El Área de Explotación 2

Celda	T ( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Longitud B (m)	i	Caudal Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Volumen anual ( $\text{hm}^3$ )
S1	1.736	701	0.0148	0.018	0.568
S2	1.736	820	0.0114	0.0163	0.513

El cálculo de volumen por flujo subterráneo horizontal ( $Sh$ ) para el año 2008 es de  $0.404 \text{ hm}^3$  para el área de explotación 1 mientras que para el área 2 se obtuvo un volumen de  $1.081 \text{ hm}^3$ .

Con estos valores anuales, se determinó que para el periodo el año de análisis 2008, el volumen de salida por flujo horizontal de las dos áreas de explotación es de  **$1.5 \text{ hm}^3$** .

### 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 para un periodo de tiempo. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, es de esperar que no se registren alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, 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 tanto para fines del balance de aguas subterráneas,  **$\Delta VS_y = 0$** .

### Solución a 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:

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

$$R_v = 1.5 + 0.2 + 0.2 - 0.0 - 1.5$$

$$R_v = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, y las entradas horizontales subterráneas:

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.4 + 1.5$$

$$R = 1.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

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 **1.9 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.

El volumen considerado como descarga natural comprometida corresponde al 20 % de la salida por flujo subterráneo horizontal para el área de explotación 1 y al 15% para el área de explotación 2, al considerar que no existe intrusión marina, y que dentro de la zona de explotación no existe un entorno ecológico que requiera este recurso para sostenerse.

Para este caso el volumen considerado como descarga natural comprometida en el área de explotación 1 es de 0.08 hm<sup>3</sup>/año y 0.16 hm<sup>3</sup>/año para el área de explotación 2, con un total de **DNC = 0.2 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 **1,115,588 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

#### **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 1.9 - 0.2 - 0.584412 \\ \text{DMA} &= 0.601760 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **584,412 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua (2008). 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.