



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL ROSARIO (0224), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología estructural	10
4.3 Geología del subsuelo.....	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Parámetros hidráulicos.....	12
5.3 Piezometría.....	12
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1 Entradas.....	16
7.1.1 Recarga vertical (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 $\Delta V(S)$	20
8. DISPONIBILIDAD	21
8.1 Recarga total media anual (R).....	21
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	21
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
9. BIBLIOGRAFÍA	24

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 Rosario, definido con la clave 0224 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del Estado de Sonora, entre los paralelos 29° 57' y 30° 35" de latitud norte, y 114° 55' y 115° 47' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2,813 km². Limita al norte con el acuífero El Socorro y San Simón, al noreste con Valle Chico-San Pedro Mártir, al este con el acuífero Matomí-Puertecitos y El Huerfanito, al sur con San Fernando-San Agustín y al oeste con el Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente se localiza en el municipio de Ensenada.

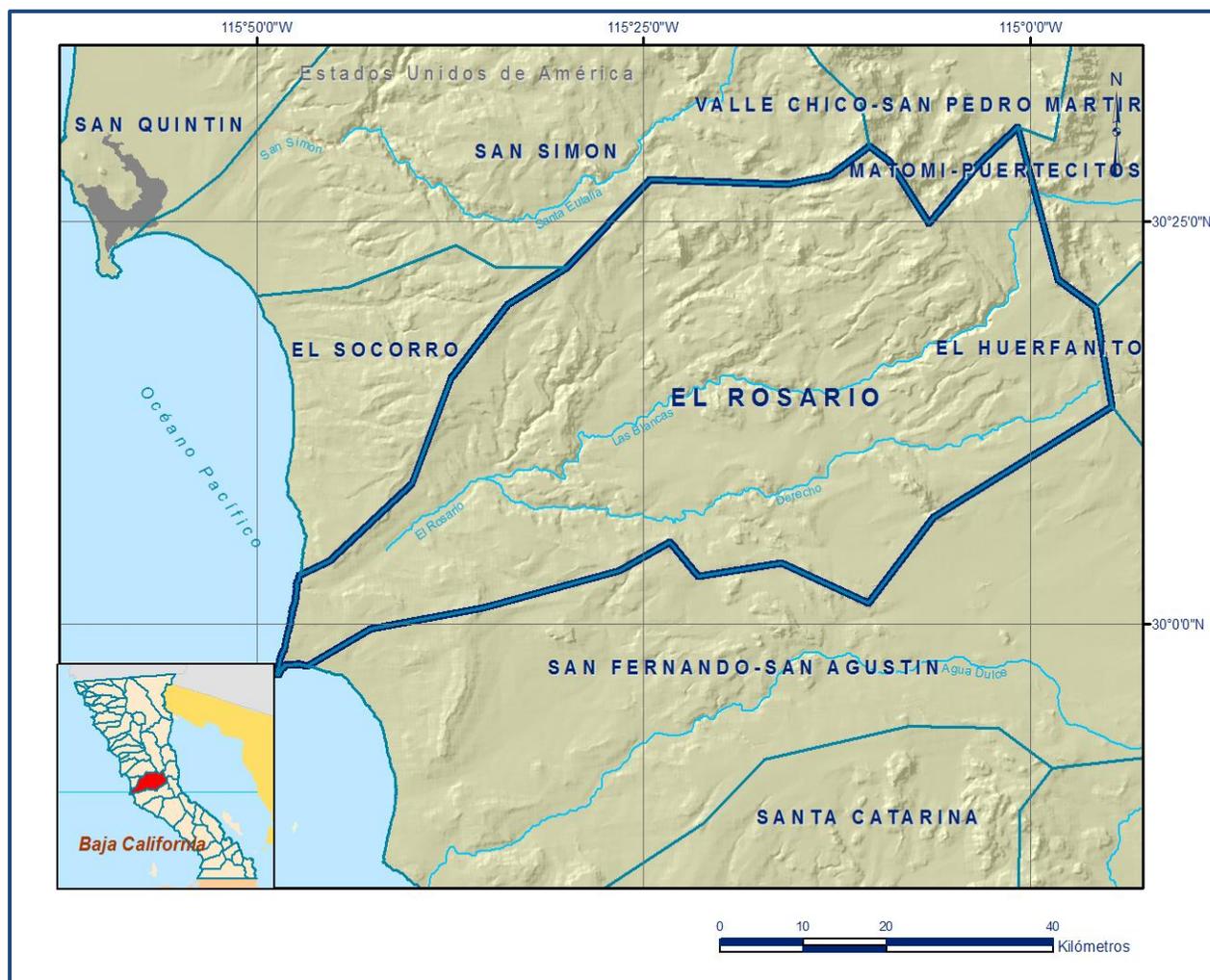


Figura 1. Localización del acuífero

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 del acuífero

ACUIFERO 0224 EL ROSARIO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	6	32.4	30	24	50.4	
2	115	3	21.6	30	28	30.0	
3	115	0	50.4	30	30	50.4	
4	114	58	15.6	30	21	21.6	
5	114	55	48.0	30	19	37.2	
6	114	54	43.2	30	13	26.4	
7	115	6	14.4	30	6	39.6	
8	115	10	26.4	30	1	15.6	
9	115	16	4.8	30	3	46.8	
10	115	21	28.8	30	2	56.4	
11	115	23	16.8	30	5	6.0	
12	115	26	34.8	30	3	18.0	
13	115	35	24.0	30	0	57.6	
14	115	42	39.6	29	59	42.0	
15	115	46	44.4	29	57	25.2	DEL 15 AL 16 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
16	115	47	13.2	30	3	0.0	
17	115	45	21.6	30	3	54.0	
18	115	40	12	30	8	42.0	
19	115	37	26.4	30	15	18.0	
20	115	33	43.2	30	19	48.0	
21	115	29	56.4	30	22	8.4	
22	115	24	36.0	30	27	36.0	
23	115	15	46.8	30	27	14.4	
24	115	12	54.0	30	27	46.8	
25	115	10	26.4	30	29	42.0	
26	115	9	7.2	30	28	40.8	
1	115	6	32.4	30	24	50.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. La totalidad del acuífero se encuentra vedado y 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 DOF el 15 de mayo de 1965. Este decreto es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el acuífero no existen distritos o unidades de riego, ni tampoco cuenta con Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). Al suroeste del acuífero se localiza una pequeña porción de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre, denominada Valle de Los Cirios, cuya fecha de decreto es del 2 de junio de 1980.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo muy pocos estudios geohidrológicos, entre los más importantes se encuentran los siguientes:

GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA DEL VALLE DEL ROSARIO EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA., elaborado por GEOFIMEX, S. C., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1973.

Desde el punto de vista hidrogeológico se consideró que el acuífero está conformado por el material aluvial encajado en un macizo impermeable; el agua subterránea fluye hacia el océano, se evapora o es extraída por pozos. Se realizaron 9 perfiles geofísicos en los que se exploró el acuífero aproximadamente hasta una profundidad de 100 m. Se observa la estructura lenticular de los rellenos; las bajas resistividades encontradas en los niveles profundos se asocian a rocas impermeables que corresponden al basamento; las resistividades de la parte permeable muestran un pequeño espesor que contiene agua dulce, mientras que en la parte cercana a la costa observan resistividades más bajas, que corresponden a la existencia de una incipiente mineralización salina.

Se determinó que la alimentación del arroyo El Rosario es importante, y que la porción norte en la zona del Cañón de las Palmas, drena la sierra de San Miguel de más de 1000 metros de altura.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA Y GEOQUÍMICA DEL VALLE EL ROSARIO MUNICIPIO DE ENSENADA, B. C., elaborado por Coordinación Técnica de Hidrología Subterránea, Control y Operación de Acuíferos, para la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en Baja California, en 1990.

En este estudio se reportó una recarga anual de 2.76 hm³ y una extracción producto de bombeo de obras, de 1.72 hm³. Se identificaron 3 unidades hidrogeológicas, divididas en i) unidad permeable, constituida por depósitos granulares integrados por grava, arena y material arcillo-arenoso, el espesor de esta unidad se estima entre los 10 y 50 m; ii) unidad semipermeable constituida por conglomerados poco consolidados, depósitos fluviales y rocas volcánicas extrusivas; iii) unidad impermeable, está representada por rocas ígneas, así como areniscas y lutitas de la Formación Rosario. Esta última unidad se encuentra tanto en las partes altas de la cuenca como en las sierras que circundan el valle, conducen el agua de precipitación a través de escurrimiento superficial hacia las zonas de depósito más permeables.

Se censaron 203 aprovechamientos de agua subterránea; 55 pozos, 146 norias y 2 manantiales; sólo 94 captaciones están en operación. La concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea varía de 835 a 4251 ppm, las menores concentraciones se presentan en la porción oriental del valle y las mayores concentraciones se encuentran en la margen izquierda.

La principal recarga que recibe el acuífero proviene de infiltraciones y flujos subterráneos, que corresponden a los afluentes que forman el arroyo. No hay presencia de conos de abatimiento.

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, 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 de este estudio 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

De acuerdo con la clasificación de las Provincias Fisiográficas del INEGI (1997), el acuífero se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California y Baja California Sur. En la porción norte destaca la sierra de San Pedro Mártir con alturas que sobrepasan los 3,000 m. La subprovincia de la sierra Cristalina (Álvarez 1964) se encuentra geográficamente limitada por el Océano Pacífico; al este por el complejo volcánico de San Pedro Mártir y al suroeste por la subprovincia de la Llanura Costera de Baja California.

Las mayores elevaciones son producto de las sierras que circundan al valle, representadas al norte por Mesa Redonda, con una elevación de 320 msnm, al noreste por San Antonio, Mesa de las Tinajas, Mesa Blanca y Pico Matomí, estos lugares con elevaciones de 720 a 1700 msnm. La zona del Valle El Rosario se encuentra entre los 10 y 100 msnm.

3.2 Clima

Para determinar el clima se considera 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 014 El Rosario durante el período 1981-2003, la temperatura media anual es de 18.7° C, la temperatura máxima de 32.6° C y la mínima de 6.9° C.

La lámina de evaporación media anual es de 1,329 mm y varía de 497 mm a 1,712 mm al año. El valle el Rosario presentó una precipitación anual muy variable durante el periodo 1981-2003, ya que se presentaron lluvias extraordinarias en este periodo; el año en que se registró la mayor precipitación total anual fue 1993 con un valor de 723.4 mm, en tanto que el año en que se registró la menor precipitación total anual fue 1987 con un valor de 73.8 mm; la precipitación media anual es de 258.3 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 Tecate. El Rosario queda integrado al municipio de Ensenada dentro de la misma Región Hidrológica. 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 oro-hidrográfico 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 Rosario es uno de los últimos escurrimientos dentro de la Región Hidrológica 1; tiene origen en las mesas de Las Tinajas, Mesa Blanca, Pico Matomí 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 Rosario pasa en su recorrido por el poblado El Rosario y su cuenca tiene una superficie de 2741 km² hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

3.4 Geomorfología

Se presenta 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 Rosario existen terrazas aluviales; las cuales se presentan con espesores mayores en la porción central del arroyo, en la margen izquierda, cerca de la comunidad El Rosario, con espesores de 8 a 10 m y los menores espesores se localizan al noreste del arroyo, aguas arriba, con espesores de 80 cm a 2 m.

4. GEOLOGÍA

La geología general del área que ocupa el acuífero El Rosario está representada principalmente por rocas ígneas extrusivas, metasedimentarias y sedimentarias (figura 2).

Las rocas sedimentarias ocupan la mayor superficie de afloramientos y comprenden 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, que pertenecen a la Formación Rosario (figura 2).

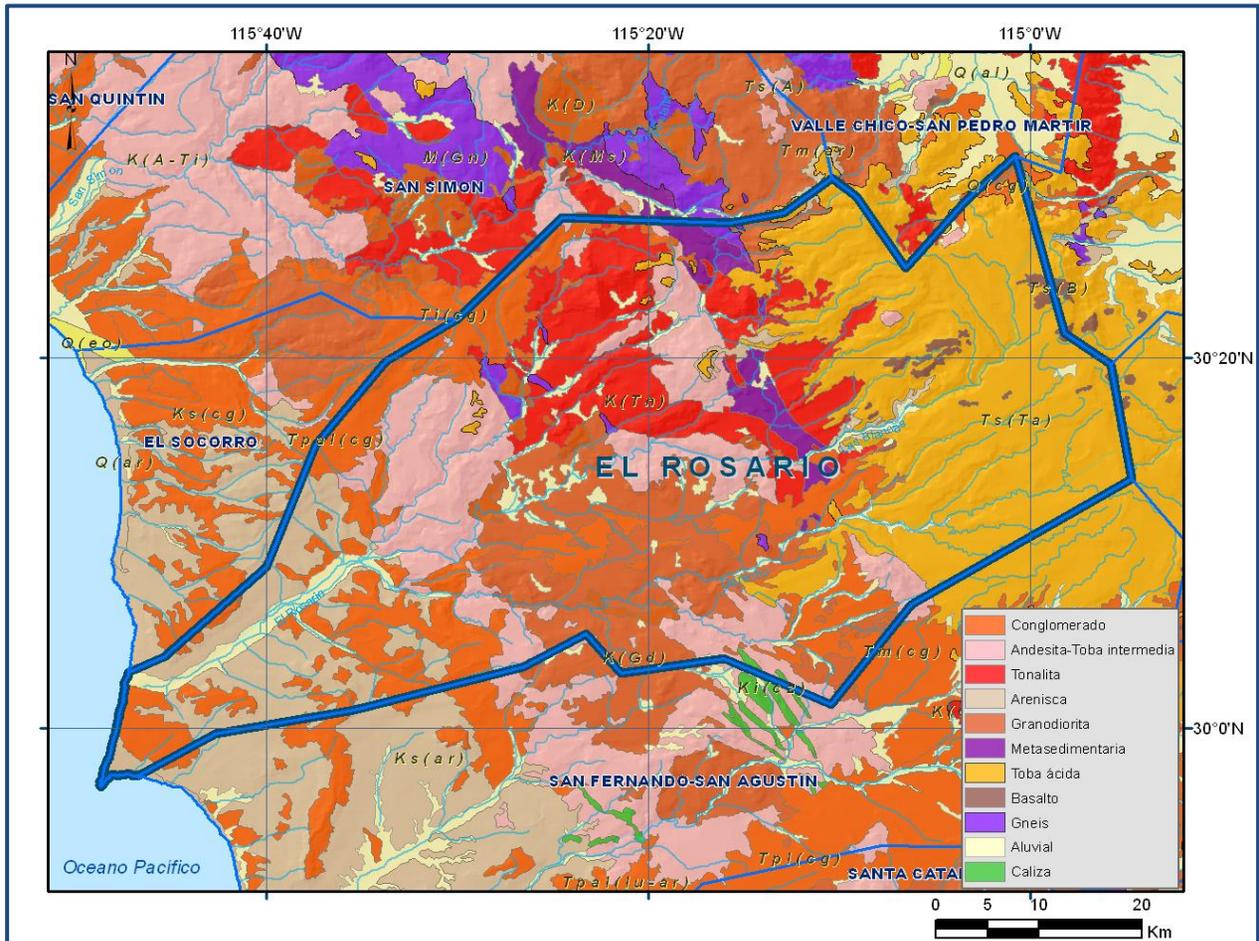


Figura 2. Geología general del acuífero

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, vulcano clásticas y sedimentarias; las rocas volcánicas tienen una composición dacítica-andesítica; en tanto que las rocas sedimentarias son producto de la denudación de las rocas volcánicas y vulcanoclásticas. 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, entre las que se encuentra el cañón San Fernando.

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

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.

En la parte alta del arroyo el Rosario, el espesor de la zona con mayor permeabilidad es de 25 a 30 m, con una resistividad que varía de 100 a 200 ohm/m, mientras que la parte media presenta una zona también permeable con los mismos espesores donde la resistividad varía de 30 a 50 ohm/m, ya que el agua presenta mayor salinidad.

La parte baja del arroyo presenta espesores de 80 a 150 m, con capas permeables en la parte alta del relleno e impermeables en la parte baja, el espesor incrementa en la parte cercana a la costa y presenta una resistividad de 6 a 9 ohm/m, lo cual indica que la capa permeable presenta elevada salinidad del agua subterránea. Se obtuvieron 3 unidades geoelectricas que de la base a la cima están agrupadas como:

Unidad Impermeable: representada por rocas ígneas como gabro, granito y rocas volcánicas no diferenciadas, así como por rocas sedimentarias como areniscas y lutitas de la Formación Rosario.

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, su importancia geohidrológica es muy limitada.

Unidad Permeable: constituida por depósitos granulares del Cuaternario, integrados por gravas, arenas y material arcillo-arenoso originados por la erosión de formaciones preexistentes, transportadas desde 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, 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 presenta como una serie de horizontes de permeabilidad variable, todos ellos 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, que en superficie favorecen el escurrimiento superficial hacia zonas de mayor permeabilidad donde se infiltra.

5.2 Parámetros hidráulicos

Debido a que no se tienen datos de pruebas de bombeo, se estimó la transmisividad a partir de los valores del caudal específico.

El valor del coeficiente de almacenamiento de 0.05, se tomó del estudio realizado en 1990. Para lo que se utilizaron datos generados en la perforación exploratoria de los pozos **PBCER-1** y **PBCER-2**, los valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Estimación de parámetros hidráulicos.

K(m/s) PROMEDIO	T(cm²/s) PROMEDIO
(PBCR-1) 1.39×10^{-4}	(PBCR-1) 6.94×10^{-3}
(PBCR-2) 9.25×10^{-5}	(PBCR-2) 9.26×10^{-3}

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

Para fines de este el cálculo de las entradas y salidas por flujo horizontal se utilizaron los valores de **17.3** y **10.1 m²/s** respectivamente.

5.3 Piezometría

Para el análisis piezométrico espacial se consideró la información recabada del año 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2007 (figura 3) varía de 1 a 23 m. Las mayores profundidades se registran al noreste del acuífero, donde se ubican áreas de cultivo. En la parte baja del acuífero, ubicada al suroeste, los niveles estáticos son muy someros con presencia de flujo base cerca del Ejido Nuevo Uruapan en la zona de menor explotación.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2007 (figura 4), va de los 5 m a los 70 m de acuerdo a topografía del terreno, la dirección del flujo subterráneo es noreste a suroeste y existen salidas por flujo subterráneo hacia el Océano Pacífico a lo largo de la línea de costa.

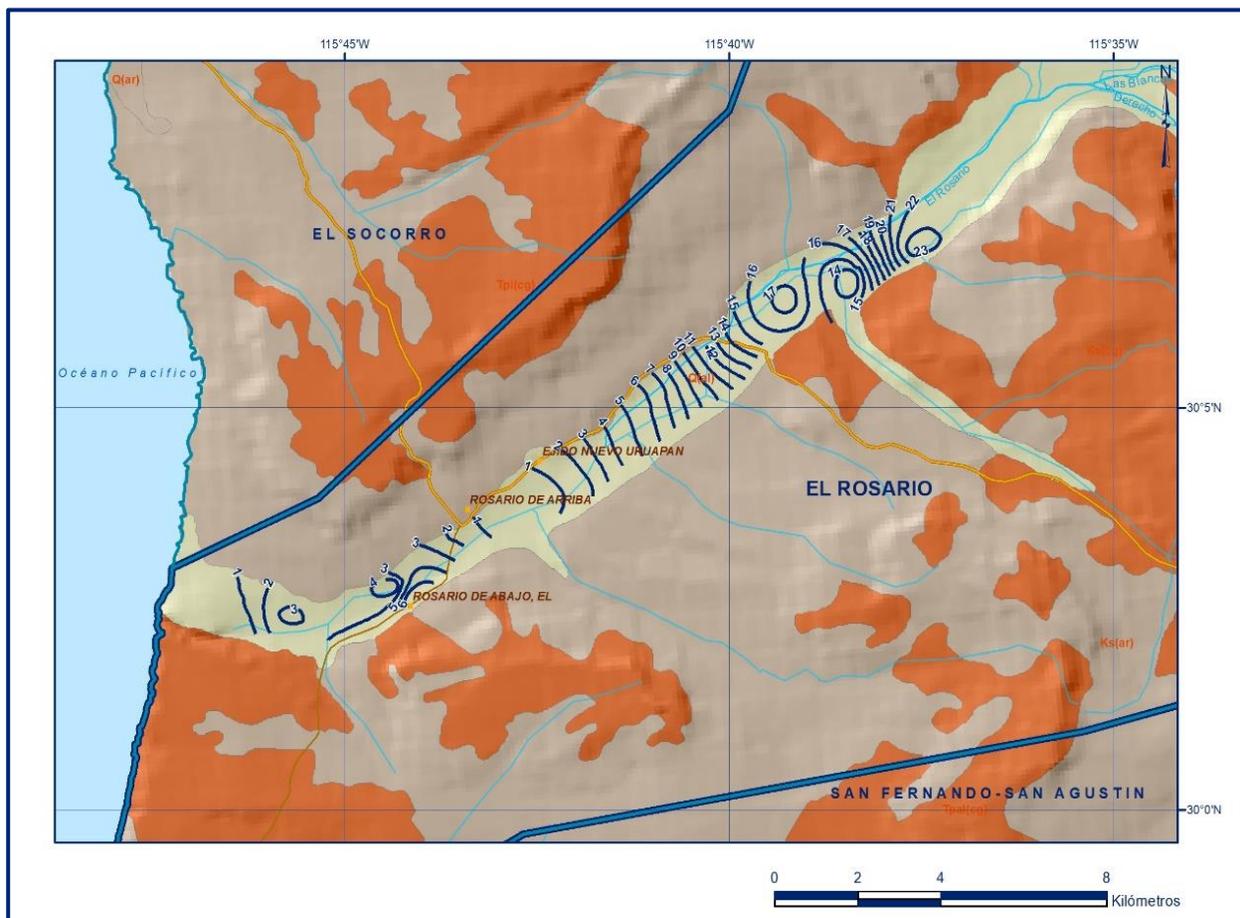


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2007)

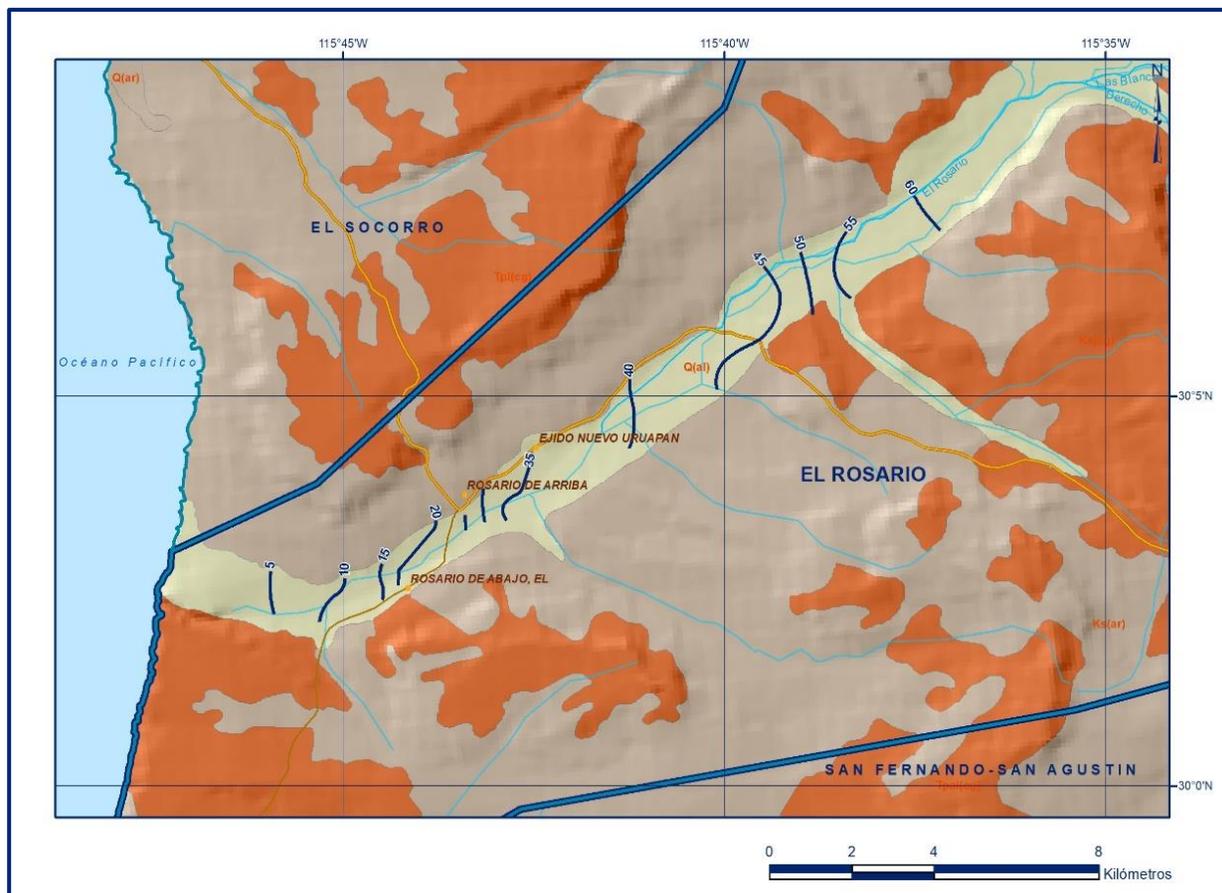


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para el periodo 1990-2007 la evolución del nivel estático en el acuífero El Rosario muestra un ligero incremento de 0.5 m, en la porción suroeste del área de balance, en la parte correspondiente a El Rosario de Abajo; mientras que, en la zona de mayor explotación, ubicada en la porción alta del acuífero, se observan ligeros descensos (figura 5).

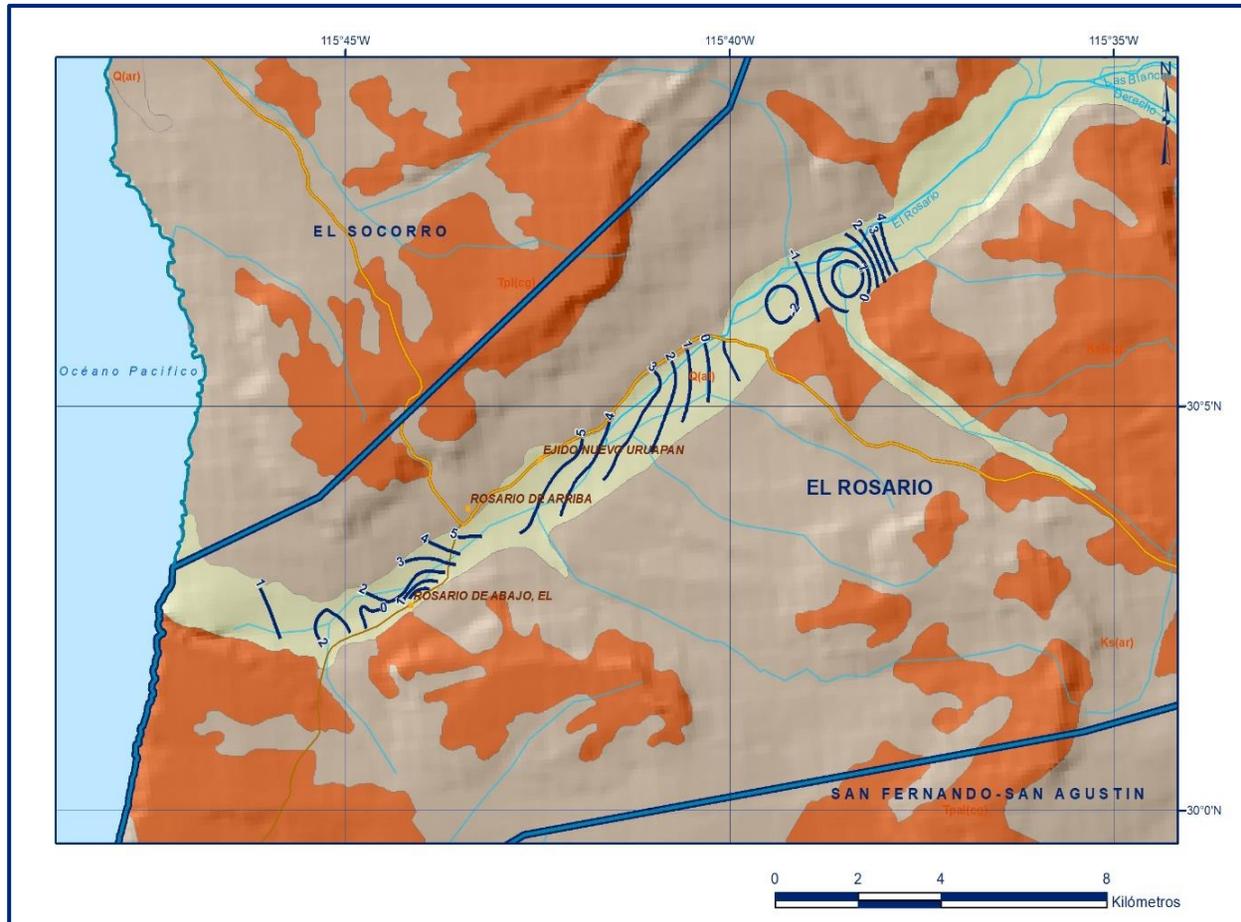


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (1990-2007).

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En 2007 la concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaba de 894 a 2658 ppm. Las menores concentraciones se localizan en la parte alta del acuífero. Las altas concentraciones de sólidos totales disueltos no se deben a una intrusión marina, se generan por mineralización natural del agua y por prácticas agrícolas deficientes al disponer los agroquímicos dentro de los pozos o norias, obteniendo mediante el bombeo agua mezclada con agroquímicos que utilizan en riego, lo cual incrementa la concentración de sólidos totales en el acuífero.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

El último censo realizado en 1990 indica que existen en el acuífero 203 aprovechamientos, 55 corresponden a pozos, 146 a norias y 2 manantiales; de ellos solamente 94 están en operación.

El volumen de extracción estimado es de 3.5 hm³/año de los cuales 2.92 hm³/año (83.4 %) se destinan al uso agrícola, 0.54 hm³/año (15.5%) al público-urbano, 0.02 hm³/año (0.7%) uso pecuario y 0.01 hm³/año (0.4 %) restante para uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

El balance de aguas subterráneas se definió para el periodo 1990-2007, en una superficie de 32.1 km² que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea. La ecuación de balance propuesta para este acuífero es:

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

B = Bombeo

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ETR = Evapotranspiración;

ΔV(S) = Cambio de almacenamiento;

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por infiltración de agua de lluvia en el valle como recarga vertical (R_v) y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). En la zona, se considera que el retorno de riego es insignificante, debido a que se emplean métodos de riego tecnificados y debido a que no existen centros de población importantes, la recarga inducida se considerará nula. **Ri = 0**.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1). De esta manera, despejando la recarga vertical (Rv) se obtiene la siguiente expresión:

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

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 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 sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

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

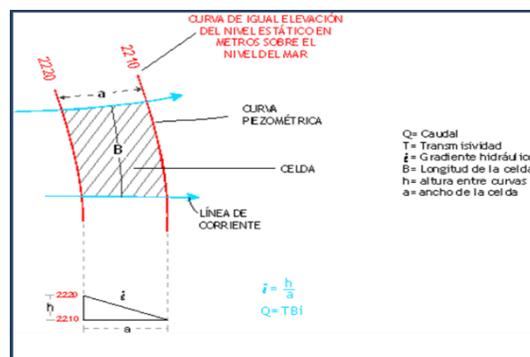
Donde:

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 para el año 2007 (tabla 3).

Tabla 3. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2007

CELDA	LONGITUD B (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1900	0.00590	0.010	0.1137	3.6
TOTAL					3.6

El cálculo del flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2007, corresponde a un valor total de **3.6 hm³/año**.

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 (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:

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

Dónde:

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

a y N = Parámetros que representan la forma del suelo. Donde a [cm], mientras que 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 = -19 cm** y **N = 3.9**, mientras que **Ks = 120 cm/día**. Con estos parámetros se construye la gráfica para la relación tasa máxima de evaporación-profundidad de influencia (tabla 4 y figura 6).

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

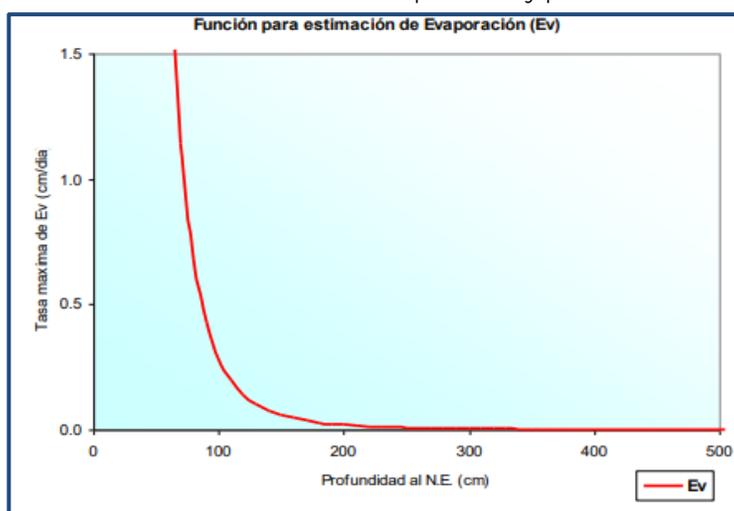


Tabla 4. Volumen de evapotranspiración de acuerdo al área

PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	ÁREA (km ²)	TASA DE EVAP. (mm/día)	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
100	0.61	2.84	0.63
200	0.56	0.19	0.04
300	0.33	0.04	0.00
TOTAL			0.70

La salida del acuífero por evapotranspiración para el año 2007 es de 0.70 hm³/año como se observa en la tabla 4.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría la extracción a través de bombeo es de **3.5 hm³/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 cuantificaron de la misma manera que las entradas por flujo subterráneo, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2007

CELDA	LONGITUD B (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	905	0.0033	0.017361	0.0518	1.6
TOTAL					1.6

El cálculo de volumen por flujo subterráneo horizontal (Sh) para el año 2007 corresponde a un total de **1.6 hm³ /año**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cambio de almacenamiento se estimó a partir de la evolución de los niveles estáticos en el periodo 1990-2007; el cambio de volumen en el período es de 6.49 hm³, que multiplicado por el coeficiente de almacenamiento (S) de 0.05, característico de un medio granular; se obtuvo un cambio de almacenamiento de 0.32 hm³ para el periodo 1990-2007, que corresponde a 0.02 hm³/año. Por lo tanto para fines del balance de aguas subterráneas, **ΔV(S) = 0**

Solución de la ecuación de balance:

Sustituyendo en la ecuación de balance los valores promedio anuales para cada componente, mediante la expresión (2), se obtiene lo siguiente:

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

$$Rv = 0.0 + 3.5 + 1.6 + 0.7 - 3.6$$

$$Rv = 2.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$\begin{aligned} R &= E_h + R_v \\ R &= 3.6 + 2.2 \\ R &= 5.8 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **5.8 hm³/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 10 % de la salida por flujo subterráneo horizontal, 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. Por lo tanto el volumen considerado como descarga natural comprometida es de **DNC = 0.2 hm³ 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 **5,207,259 m³ 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 5.8 - 0.2 - 5.207259 \\ \text{DMA} &= 0.392741 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **392,741 m³ 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”, elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1973. Geología, Geofísica y Geoquímica del Valle del Rosario en el Estado de Baja California. GEOFIMEX, S.C.