



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO LA MISIÓN (0206), ESTADO DE BAJA  
CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
	<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
1.1	Localización .....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1	Provincias fisiográficas .....	5
3.2	Clima .....	6
3.3	Hidrografía .....	7
3.4	Geomorfología.....	7
<b>4</b>	<b>GEOLOGÍA .....</b>	<b>8</b>
4.1	Estratigrafía .....	10
4.2	Geología estructural.....	16
4.3	Geología del subsuelo.....	16
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
5.1	Tipo de acuífero.....	17
5.2	Parámetros hidráulicos.....	17
5.3	Piezometría.....	18
5.4	Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1	Profundidad del nivel estático .....	18
5.4.2	Elevación del nivel estático .....	19
5.4.3	Evolución del nivel estático .....	20
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	21
<b>6</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>22</b>
7.1	Entradas.....	23
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	24
7.1.3	Recarga Incidental (Ri).....	25
7.2	Salidas .....	25
7.2.1	Bombeo (B) .....	25
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	26
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	26
7.3	Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	28
<b>8</b>	<b>DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>29</b>
8.1	Recarga total media anual (R).....	29
8.2	Descarga natural comprometida (DNC) .....	29
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	30
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>31</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 La Misión, definido con la clave 0206 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza geográficamente en la porción noroccidental del estado de Baja California, entre los paralelos 32°00'31" y 32°13'26" de latitud norte y los meridianos 116°31'16" y 116° 54'28" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 476 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con el acuífero El Descanso; al este y sureste con el acuífero Guadalupe; al sur con el acuífero Ensenada; al oeste su límite es el Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente, comprende parcialmente territorio los municipios de Ensenada; Playas de Rosarito, Tijuana y Tecate.

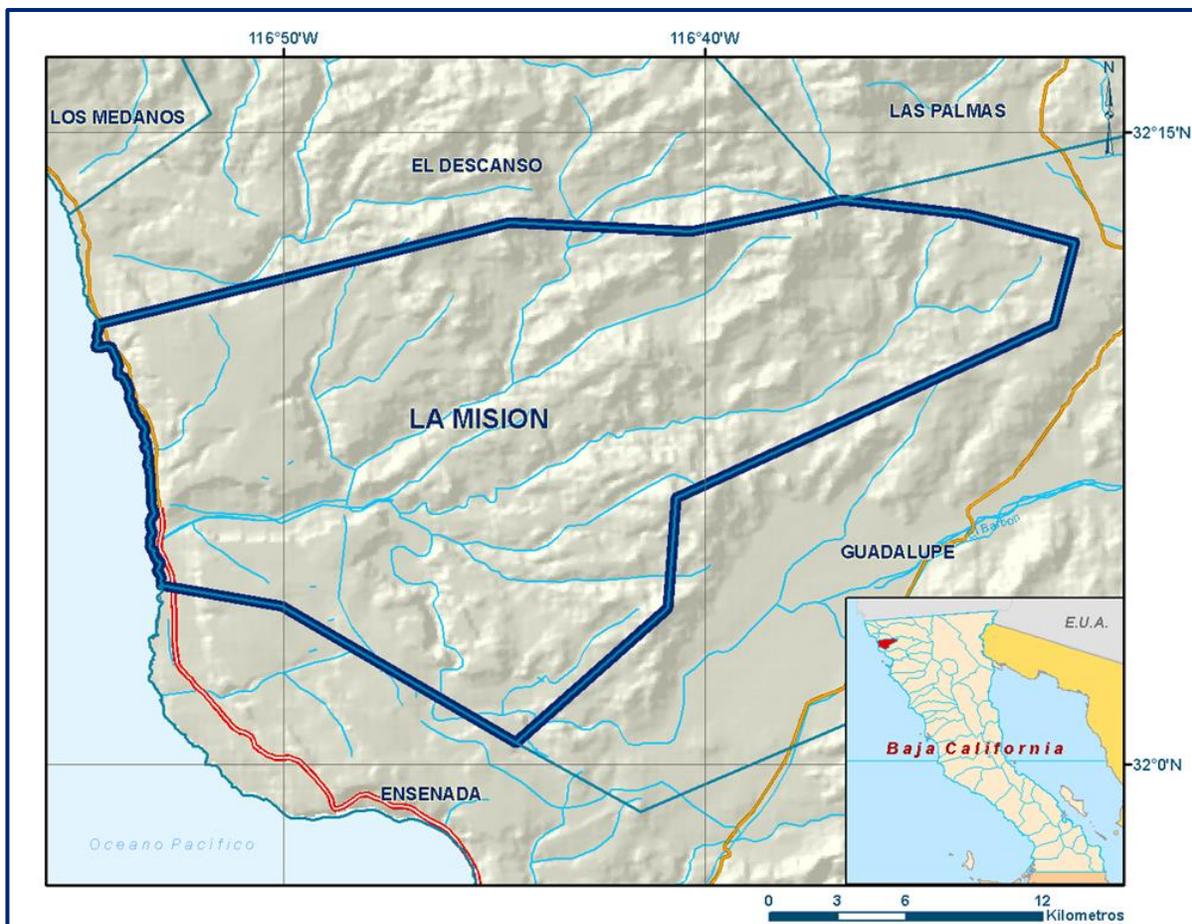


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0206 LA MISION							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	52	56.1	32	4	15.0	DEL 1 AL 2 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	116	54	24.8	32	10	26.6	
3	116	44	39.1	32	12	52.2	
4	116	40	22.1	32	12	38.9	
5	116	36	48.2	32	13	24.3	
6	116	33	48.1	32	13	4.4	
7	116	31	15.0	32	12	24.0	
8	116	31	45.4	32	10	26.9	
9	116	40	42.1	32	6	19.9	
10	116	40	54.0	32	3	43.6	
11	116	44	30.6	32	0	31.5	
12	116	50	3.9	32	3	45.2	
1	116	52	56.1	32	4	15.0	

## **1.2 Situación administrativa del acuífero**

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California y al Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999.

Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del decreto de veda “*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 es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En el territorio del acuífero no se localiza ningún Distrito de Riego, ni se ha constituido a la fecha su Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

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

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado diversos estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS ACUÍFEROS TIJUANA Y LA MISIÓN, BAJA CALIFORNIA. Realizado en 1999 por Consultores en Agua Subterránea, S.A. para Comisión Nacional del Agua.** Tuvo como objetivos describir el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero, determinar la magnitud de las componentes de la ecuación de balance de aguas subterráneas para conocer su disponibilidad, así como construir un modelo tridimensional de simulación hidrodinámica del acuífero y diseñar una red de monitoreo de los niveles del agua subterránea.

**ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO MANEADERO, BAJA CALIFORNIA NORTE. Elaborado por Desarrollo y Sistemas, S.A. para la Comisión Nacional del Agua en 1999.** Mediante la construcción del modelo de simulación y el diseño de una red piezométrica de monitoreo, evalúa el impacto de diferentes políticas de operación y acciones sobre el acuífero en los próximos años. Concluye que la estabilización del acuífero a largo plazo depende de no incrementar la extracción para la ciudad de Ensenada, así como de la reducción gradual hasta en un 50% de las extracciones para uso agrícola e industrial con respecto a los 18 hm<sup>3</sup> extraídos para dicho fin en 1998.

**VERIFICACIÓN GEOLÓGICA EN EL SITIO DEL PROYECTO DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL MÉXICO-JAPÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PRESA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO LA MISIÓN, B.C. INFORME TÉCNICO GAS/2002/01. Elaborado en 2002 por Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas-SGT.** Contiene la descripción geológica detallada de la secuencia estratigráfica identificada en la zona y de las perforaciones exploratorias, elaborada como estudio básico para el proyecto de construcción de la presa subterránea.

**PRESA SUBTERRÁNEA LA MISIÓN, MUNICIPIO DE ENSENADA, B.C. ESTUDIOS BÁSICOS Y ANTEPROYECTO. Elaborado en el año 2004 por la Gerencia de Aguas Subterráneas-SGT de la Comisión Nacional del Agua.** Contiene información general del acuífero y los resultados de los estudios básicos y del anteproyecto para determinar la factibilidad y efectividad de construir una presa subterránea, para el desarrollo de los recursos hídricos de la región, como parte de un convenio de colaboración entre la CONAGUA y Japan Green Resources Corporation (J-Green).

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO LA MISIÓN Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Baja California, 2020.** Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, así como la hidrometría de las extracciones.

### **3 FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincias fisiográficas**

De acuerdo con la clasificación de las Provincias Fisiográficas Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Baja California, Subprovincia Sierra de Juárez. Esta sierra 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 que probablemente constituye un escarpe de falla hacia el 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 de Juárez y San Pedro Mártir en Baja California.

De acuerdo con la clasificación de las Provincias Fisiográficas de INEGI (1997), la zona de estudio se ubica dentro de la Provincia Península de Baja California y en la Subprovincia Sierras de Baja California Norte.

La Provincia Península de Baja California abarca una pequeña extensión en territorio estadounidense, más de 80% del estado de Baja California y la totalidad del estado de Baja California Sur. El eje geológico estructural que da la forma alargada y angosta es su Cordillera Peninsular que tiene la misma orientación que la provincia, el núcleo granítico masivo batolítico que la constituye aflora en el norte y queda sepultado hacia el sur. La Cordillera Peninsular remata en su extremo meridional en el bloque del Cabo, donde vuelven a quedar expuestas las rocas graníticas. Sus cumbres más elevadas se encuentran en las sierras del norte del estado de Baja California, donde alcanzan desde 2,000 hasta alrededor de 3,000 msnm, como la sierra San Pedro Mártir cuya máxima elevación es de 3,100 m. La mitad sur de la cordillera corresponde a la Sierra de la Giganta, que tiene sus cumbres más altas en el norte, pero la mayor parte de ellas no llegan a los 1,000 msnm, altitud que es superada en la región del Cabo.

La Subprovincia Sierras de Baja California Norte es parte de la Cordillera Peninsular bajacaliforniana y está constituida en su mayoría por las rocas de un gran cuerpo ígneo intrusivo batolítico. De norte a sur, a partir de la frontera con los Estados Unidos de América, sus primeras unidades orográficas son las sierras Juárez y San Pedro Mártir, separadas entre sí por una barranca angosta que marca la línea de falla Agua Blanca, la cual tiene un rumbo oeste-noroeste-este-sureste e inicia unos kilómetros al sur de Ensenada.

### **3.2 Clima**

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para México por E. García, se determina que en la superficie que cubre el acuífero existen diferentes tipos de clima determinados por la variación de la altitud topográfica: el clima seco templado húmedo se presenta en las regiones topográficamente más altas y los secos y semisecos se presentan en las partes bajas; ambos se caracterizan por registrar fuertes oscilaciones térmicas y pluviométricas. Predomina el tipo Bsk(s) que pertenece al grupo de climas semisecos, subtipo templado mediterráneo, con régimen de lluvias invernales algo extremoso que se registran principalmente de octubre a marzo. Presenta abundante humedad en la costa durante estos meses y seco prácticamente en el resto de la zona, verano fresco con niebla frecuente. En menor proporción se presentan los tipos de clima muy seco o desértico (Bw), subtipos semicálido y cálido, con verano fresco y régimen de lluvias en invierno; y el clima templado (Cs), subtipo húmedo, régimen de lluvias invernales y verano fresco a cálido algo extremoso.

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información la estación “Valle de la Misión” para el periodo 2000-2021. Con base en esta información, se obtuvieron

los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial de **17.0 °C, 310.0 mm y 1433.3 mm**, respectivamente. Los valores máximos de temperatura, mayores de 21 °C, se registran entre los meses de julio a septiembre, en tanto que las temperaturas mínimas (menores de 12 °C) se presentan de diciembre a febrero. El régimen de lluvias se registra principalmente de octubre a marzo; el máximo valor se presenta en enero y junio es el mes más seco. Las temperaturas mínimas se registran entre los meses de diciembre a febrero.

La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de lluvias torrenciales. Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de lluvias extraordinarias, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero. Las condiciones de aridez, causadas por las bajas precipitaciones pluviales, son agravadas por la presencia de sequías que ocasionan una disminución de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento.

### **3.3 Hidrografía**

El área se ubica en la Región Hidrológica No. 1 Baja California Noroeste, cuenca Río Tijuana-Arroyo Maneadero, subcuenca del Río Guadalupe. El Río Guadalupe tiene su origen en la Sierra de Juárez, en las inmediaciones de la Ranchería El Rayo, desde donde fluye en dirección E-W hasta Real del Castillo, para después cambiar de dirección a SW-NE, paralela al eje de la sierra, hasta 2 km al norte de la ranchería La Misión, lugar en donde nuevamente adopta su dirección original E-W hasta su desembocadura hacia el Océano Pacífico, en la cercanía de Punta Salsipuedes, en el lugar conocido como Boca La Misión de San Miguel. La distancia media entre su cabecera y su desembocadura es de 98 km, con un desnivel de 1000 m y un desarrollo de aproximadamente 115 km.

La red hidrográfica está conformada por una serie de arroyos de tipo intermitente que alimentan al cauce del dren principal que es el Río Guadalupe. Entre sus afluentes más importantes destacan los arroyos La Zorra y Agua Escondida, por la margen derecha; y los arroyos Encimo, Los Alisos, EL Golpe y Guadalupe, por la margen izquierda. En la cuenca del río Guadalupe se localizan cuatro acuíferos: Ojos Negros, Real del Castillo, Guadalupe y La Misión.

### **3.4 Geomorfología**

La cuenca del río Guadalupe a la que pertenece el valle La Misión, está constituida por dos subcuencas intermontanas y una costera. En esta última se ubica el acuífero La Misión. Los

rasgos morfológicos de la Sierra de Juárez, 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 Terciario que emergió durante el Cuaternario. La cuenca del río Guadalupe se extiende desde el borde occidental de la sierra de Juárez con un desnivel de más de 1,000 m entre sus puntos terminales. sus rasgos fisiográficos y geomorfológicos están modelados, en su mayor parte, por estructuras geológicas, con las cuales se encuentra íntimamente ligada. Se identifican dos unidades hidrogeomorfológicas que corresponden con los valles y sierras. El Valle la Misión está formado por una estrecha depresión topográfica de laderas acantiladas, que constituye la salida natural del río Guadalupe (o La Misión), en dirección E-W hasta su desembocadura en forma perpendicular hacia el Océano Pacífico.

La franja costera muestra un aspecto rugoso, con lomeríos y mesas constituidas de sedimentos marinos en su base y frecuentemente coronados por derrames de lavas basálticas y tobas. Otro rasgo característico es la presencia de terrazas marinas bien desarrolladas, cuya extensión comprende desde el norte del condado San Diego, USA, hasta 10 km al norte de Ensenada. Las playas del litoral se extienden continuamente en forma paralela al borde continental; son por lo general angostas, excepto en las desembocaduras de los arroyos en donde se ensanchan y frecuentemente forman pequeños deltas. La línea costera, muy regular, consiste en una secuencia de amplias curvas o semicírculos cóncavos hacia el oeste, de hasta los 30 km de longitud.

#### **4 GEOLOGÍA**

La geología regional es el reflejo de una zonación litológica–estructural que se manifiesta en toda la península de Baja California, en la que se distinguen tres grandes fajas longitudinales que cubren, prácticamente, toda su superficie. La distribución de las diferentes unidades litológicas se puede definir según tres grandes franjas longitudinales preterciarias que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas diferentes, que se encuentran cubiertas de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Terciario y Cuaternario (figura 2). Su distribución de oeste a este es la siguiente:

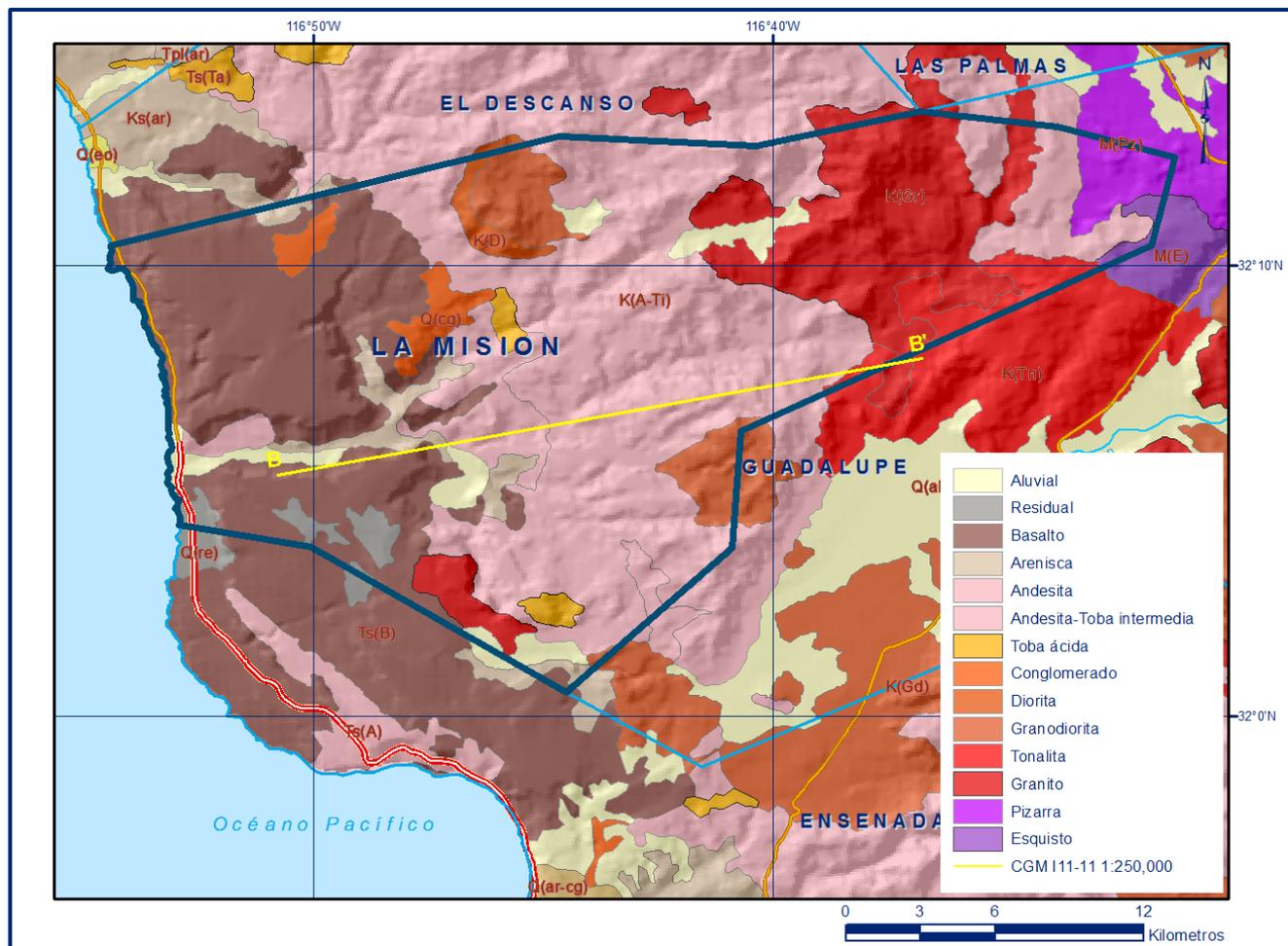


Figura 2. Geología general del acuífero

La más occidental, que incluye la línea costera, consiste en una angosta serie de terrazas que litológicamente corresponden a una acumulación de sedimentos marinos y continentales ocurridos entre el Cretácico Superior, poco consolidados y sin evidencias de perturbaciones tectónicas de importancia. Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados, que contienen tanto fauna marina como huesos de saurios, que reflejan el desarrollo de ambientes que variaron desde continentales hasta de plataforma y talud, con líneas de costa fluctuantes, semiparalelas a la línea de costa que divide a esta franja de los terrenos ubicados al oriente, que constituyeron la fuente de suministro de los sedimentos clásticos. Gastil et al. (1975) denominan a este límite como la “línea Santillán–Barrera”, y consideran que este rasgo ha controlado el depósito por largos periodos.

La zona intermedia es formada por una gruesa sucesión de rocas volcánicas, predominantemente piroclásticas, intercaladas con areniscas y conglomerados, acompañadas de algunas intrusiones, cuya edad corresponde al Cretácico Inferior. La

secuencia superior y de mayor distribución fue definida por Santillán-Barrera como Formación Alisitos, en la localidad tipo Rancho Alisitos, ubicado al sur de Ensenada, constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano-Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas. En algunas localidades cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica, se encuentra deformada, parcialmente metamorfizada y afectada por numerosas fallas y por emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. La franja oriental está constituida por rocas intrusivas y metamórficas producto de metamorfismo regional de rocas sedimentarias. A esta franja pertenecen los batolitos mesozoicos de tonalitas-granodioritas y granitos, y rocas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos, cuya edad no ha sido aún bien definida. Las secuencias metamórficas prebatolíticas asociadas presentan diferentes facies metamórficas y su edad es motivo de discusión. Predominan los esquistos, gneises, cuarcitas y pizarras.

El Cenozoico se caracteriza por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales que afloran en diversas localidades, por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo en el borde occidental de la península, y por una importante actividad volcánica que cubre parcialmente a las franjas mesozoicas descritas.

Durante el Plioceno y Pleistoceno se acumularon depósitos marinos en una serie de terrazas que alcanzan una altura de hasta 500 m, asociadas a cambios glaciares del nivel del mar (Gastil et al, op. cit.), que se desarrollaron en el marco de una serie de levantamientos y basculamientos de las zonas costeras durante el Plioceno-Pleistoceno. Tierra adentro se presentan depósitos aluviales, eólicos y lacustres, cuya acumulación ocurre en la actualidad.

#### **4.1 Estratigrafía**

En la cuenca tributaria del Valle de La Misión se encuentran aflorando rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, que tienen un rango de edad que va del Cretácico Superior hasta el Reciente.

### **CRETÁCICO INFERIOR**

#### **Formación Alisitos**

Definida formalmente por Santillán y Barrera (1930) en la localidad tipo Rancho Alisitos, ubicado en el Valle Santo Tomás. Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980). Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. Se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada y afectada por numerosas fallas y por emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace en forma discordante a la Formación Rosario y sus afloramientos se extienden por más de 24 km a lo largo de toda la porción occidental del norte de la península de Baja California, desde Punta China hasta casi llega a Rosarito. Existen numerosos afloramientos de esta secuencia en la margen occidental de las actuales sierras cristalinas que son correlacionables en litología y contenido faunístico.

De acuerdo con Rangin (1978) *in: INEGI (1984)*, la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental. Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste. La Formación Alisitos estuvo sujeta a un periodo de compresión, a principios del Cretácico Tardío, que plegó la secuencia y la metamorfozó parcialmente. Durante este periodo la secuencia emergió y al occidente comenzó la sedimentación de lo que sería la Formación Rosario.

### **Rocas ígneas Intrusivas**

Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro. Los cuerpos plutónicos varían en edad de O a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos. Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico. Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques. Afloran al sur del área, sobre la carretera federal No. 1 en el tramo La Misión-Ensenada, al sureste del Ejido Santa Rosa, y al oeste de La Zorra, en

donde cuerpos graníticos intrusionan a tobas riolíticas y son cubiertos por rocas basálticas a las que metamorfizan.

## **CRETÁCICO SUPERIOR**

### **Formación Redondo**

Consiste principalmente de conglomerados rojizos de guijarros y boleos que contienen lentes de areniscas y lodolitas. La composición de los clastos varía según el tipo local de roca del basamento. De acuerdo con Flynn (1970) y según la localidad donde afloran, los sedimentos de esta formación pueden ser fanglomerados aluviales o pertenecer a las facies aluviales. Constituye la unidad basamental de la secuencia sedimentaria del Cretácico Superior, que yacen en forma discordante sobre rocas metavolcánicas de la Formación Alisitos y de las rocas batolíticas del basamento regional que constituye el Batolito Peninsular. Su edad se desconoce por carecer de fósiles. Según Flynn (1970) y Gastil *et al.* (1975), probablemente su depósito se inició en el Turoniano durante una disminución del nivel del mar. En esta época, la línea de costa se localizaba al oeste de donde ahora se localizan las Islas Coronado. La unidad no aflora en el área del acuífero.

### **Formación Rosario**

Su nombre fue designado formalmente por Beal en 1948 (en López, R., 1985), para referirse a un afloramiento de areniscas de color café y arcillas de color oscuro, con lentes de conglomerado, cuya localidad tipo se encuentra en el Arroyo Rosario, ubicado al noreste del poblado del mismo nombre; asignándole una edad Campaniano-Maestrictiano. Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino; se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos pre-terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea "Santillán-Barrera" que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar. Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior, (b) miembro lodolítico medio y (c) miembro conglomerático-arenoso superior. Los tres presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico). La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar. En términos

geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerdan con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío.

Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas la ubican estratigráficamente en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Su espesor máximo es de 750 m. Se correlaciona con las formaciones Point Loma y Cabrillo del área de San Diego.

## **TERCIARIO (Neógeno)**

### **Formación Delicias**

De acuerdo con López (1980), está limitada en forma discordante y ligeramente angular por la subyacente formación Rosario y el conglomerado sobreyacente de la Formación Buenos Aires. Su localidad tipo se ubica al este del Rancho Delicias, aproximadamente en un lugar equidistante entre la Playa Rosarito y la Preas Abelardo L. Rodríguez, al sureste de Tijuana, donde descansa discordantemente sobre las rocas más antiguas. Está conformada por areniscas y lutitas de color café a pardo, textura masiva a estratificación delgada, con interestratificaciones de lodolita verdosa; depositadas en el Eoceno en un ambiente de aguas someras y salobres. Se correlaciona con la Formación La Joya, de la región de San Diego, California.

### **Formación Las Palmas**

Aflora al norte del acuífero fuera de sus límites, de manera discordante sobre la unidad anterior y está conformada por conglomerados polimícticos y en menor proporción areniscas y lutitas. Se correlacionan hacia el oeste con la Formación Buenos Aires del Eoceno Superior y con los Conglomerados Poway y Ballenas de la región de San Diego.

### **Formación Rosarito Beach**

Representa el depósito en la cuenca Rosarito Beach formada en el Mioceno Medio. Ashby y Minch (1988) y Ashby (1989) la dividieron en dos subcuencas: Tijuana al norte y la Misión al sur. Subdivida en diez miembros: cinco se localizan en la subcuenca Tijuana y cinco en La Misión (Ashby, 1989). Los cinco miembros de la Subcuenca La Misión son (de la base a la cima): Punta Mesquite, Medio Camino, La Misión, Los Indios y Descanso. Los cinco miembros de la Subcuenca Tijuana son (de la base a la cima): Mira al Mar, Costa Azul, Amado Nervo, Las Glorias y Los Buenos.

Los afloramientos actuales de rocas de la Cuenca Rosarito Beach se encuentran limitados al este por los terrenos batolíticos y prebatolíticos de las serranías peninsulares y hacia el oeste por la actual línea de costa. La margen occidental puede extenderse para incluir a las islas Los Coronados, cerca de Tijuana y a las islas Todos Santos cercanas a Ensenada. El límite norte se extiende hacia la porción sur del condado de San Diego, California, en donde se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos plio-pleistocénicos marinos y gravas fluviales. Los afloramientos meridionales se presentan en Punta San Miguel y al suroeste en las islas Todos Santos.

De acuerdo con Ashby (1989) la sección típica del miembro Punta Mesquite aflora a lo largo de la costa, desde Punta Mesquite hasta el área de Medio Camino. Este miembro consiste de dos unidades: una brecha basamental y una secuencia sobreyacente de tobas y areniscas tobáceas. La brecha es sedimentaria de color café grisáceo claro a medio, masiva a poco estratificada con clastos angulares a subangulares, pobre a moderadamente clasificados. Sus clastos consisten en metavolcánicos prebatolíticos, rocas graníticas y sedimentarias, en una matriz de arenisca tobácea de color café grisáceo claro a medio de grano fino a medio, subangulares a subredondeados, pobremente clasificados. Carece de fósiles y se encuentra en contacto discordante sobre el miembro lodolítico medio de la formación Rosario. Se correlaciona con las rocas volcánicas Conejo y El Modelo del sur de California.

### **Formación San Diego**

Está constituida por estratos de arenisca con intercalaciones de conglomerado, que cubren discordantemente a la Formación Rosarito Beach, depositados en un ambiente marino somero con variaciones a continental. Aflora en los alrededores de Tijuana y San Diego y se correlaciona con la Formación Pico del Sur en California.

### **Neógeno Marino (Plioceno)**

Según Gastil (1975) los conglomerados polimícticos se depositaron en la delgada franja costera que se extiende desde la Ciudad de Los Ángeles hasta los 28° de latitud norte. Los depósitos marinos dieron origen a la formación de terrazas que actualmente pueden estar aflorando algunos kilómetros tierra adentro de la península y corresponde con lo que Heim (1922, en Gastil *op.cit.*) denominó Formación Salada.

### **Neógeno Continental (Plioceno)**

Con este nombre se agruparon los depósitos de talud que se distribuyen sobre las unidades preterciarias que conforman las zonas de topografía elevada. Son materiales granulares producto de la denudación de rocas pre-existentes que se encuentran consolidados, formando lomeríos sobre los flancos y base de las sierras. Están conformados por conglomerados de rocas ígneas, cuyos fragmentos se encuentran soportados por una matriz areno-arcillosa, presentan estructura masiva y al intemperizarse tienden a formar bloques, su fracturamiento es escaso y presentan buena compactación. La edad de estos depósitos fue determinada por Gastil (op.cit.) con base en su relación estratigráfica con los depósitos del Plioceno marino, por lo que les asignó esta misma edad. Se presentan sobreyaciendo discordantemente a los estratos de la formación Alisitos y a las rocas intrusivas graníticas que conforman las sierras.

## **CUATERNARIO**

### **Cuaternario marino (Pleistoceno)**

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California. La Unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, *op. cit.*), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas. Al sur de Rosarito los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada. En la planicie costera están cubiertos por los materiales aluviales recientes o conformando pequeñas mesetas.

### **Depósitos recientes**

Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas, están representados por conglomerados y areniscas, que se presentan como terrazas continentales y depósitos aluviales. Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte, los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas; formando en ocasiones abanicos aluviales. Están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación.

Sus áreas de exposición se restringen a las márgenes de los arroyos Guadalupe y La Pila, formando terrazas fluviales y en las laderas de las elevaciones que flanquean sus cauces, como incipientes abanicos aluviales; en la desembocadura del arroyo de Guadalupe, se forma un pequeño delta y en la zona litoral, playas de poca amplitud.

## **4.2 Geología estructural**

Las estructuras más importantes son fallas, estructuras circulares, foliación y estratificación. La estructura San Marcos se considera un megabloque alóctono ordovícico dentro de metasedimentos flysch del Triásico-Jurásico. La foliación se observa principalmente en los metasedimentos con rumbo predominante noroeste-sureste y echados al noreste y suroeste; la foliación en las rocas plutónicas del oriente, localmente deformadas, no presenta una orientación bien definida. La estratificación en las secuencias del Cretácico Superior y del Terciario presenta echados con tendencia al suroeste. Como resultado de las múltiples intrusiones cretácicas se originaron estructuras circulares como los plutones El Pinal, La Posta y parte de El Topo, con yacimientos relacionados de tungsteno y oro. La estructura más importante es la falla de desplazamiento lateral derecho San Miguel-Vallecitos, de rumbo NO-SE, actualmente activa, con actividad sísmica continua en las últimas décadas, relacionada con el régimen tectónico del sistema San Andrés-Golfo de California. Al sureste de Tijuana existen fallas normales escalonadas con caída hacia el noroeste, indicando parte de una cuenca estructural. Del lado sur de la falla San Miguel-Vallecitos está la continuación de la cuenca “pull-apart” Ojos Negros (Carta Geológico-Minera I11-11 “Tijuana”, escala 1:250000 SGM, 2003).

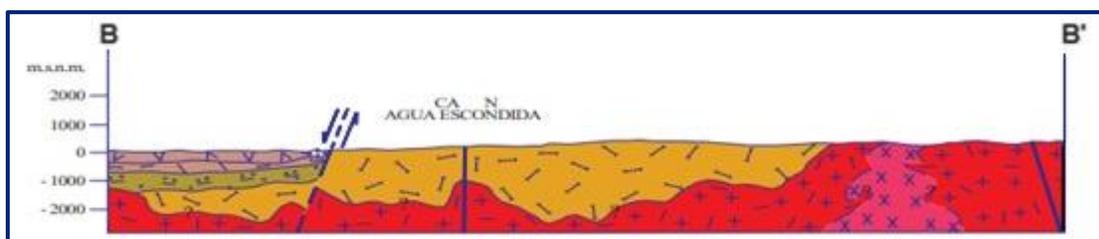
Tomando en cuenta que la zona, se localiza en la margen occidental de la Península de Baja California, y que ésta se comportó como un bloque estable en los diferentes periodos de deformación que afectaron a gran parte del país, las principales estructuras generadas corresponden con un patrón de fallas y fracturas asociadas con movimientos verticales, así como las generadas a partir de la actividad de la falla Agua Blanca, la cual propició la formación de una serie de fallas y fracturas con una tendencia NO-SE. Regionalmente, esta zona corresponde con la provincia estructural que Gastil (1975), denomina Península Septentrional Estable, la cual se caracteriza por presentar una familia de fallas y fracturas con rumbo predominante NO. El fallamiento ha ocasionado la formación de fosas tectónicas a lo largo del curso del arroyo de Guadalupe; estas relaciones son claras en la zona de Rancho Viejo y sobre la margen izquierda en la zona de Misión de San Miguel.

## **4.3 Geología del subsuelo**

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica y cortes litológicos de pozos exploratorios, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial y fluvial de granulometría variada y conglomerados, depositados en los cauces de los arroyos; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas,

sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias de la formación Alisitos, cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias.

Los depósitos clásticos están constituidos por gravas y arenas con algunas intercalaciones de arcillas, que presentan cambios laterales de facies.; su espesor varía de 15 a 60 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros (figura 3).



Fuente: Carta Geológica I11-11 "Tijuana" 1:250,000 (SGM, 2009)

Figura 3. Sección geológica esquemática

## 5 HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de tipo libre, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos, que se aloja principalmente en un paquete de depósitos sedimentarios cuaternarios no consolidados de alta permeabilidad y poco espesor que constituyen los depósitos fluviales del arroyo Guadalupe, contenidos por rocas volcánicas y sedimentarias de baja permeabilidad. Está integrado, en su porción superior, por un medio granular conformado por sedimentos clásticos de granulometría variada y conglomerados cuyo espesor máximo es de 60 m; en su porción inferior por rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

### 5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo de corta duración por métodos convencionales y por el método numérico Rathod and Rushton (1991), así como las pruebas de permeabilidad realizadas en distinto tramos de los pozos exploratorios, procedentes de estudios previos, se determina que la conductividad

hidráulica de los materiales que conforman el medio poroso varía de **0.002 a 408 m/día ( $2.1 \times 10^{-6}$  a  $4.7 \times 10^{-3}$  m/s)**; en tanto que los valores de transmisividad oscilan entre  **$5.9 \times 10^{-5}$  y  $5.3 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (5.1 a 4609 m<sup>2</sup>/d)**, predominando valores entre 10 y 20  $\times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s (864 a 1728 m<sup>2</sup>/d). Los valores más altos se presentan en los depósitos granulares del cauce de los arroyos y los menores asociados a depósitos de granulometría fina y las rocas del basamento.

De la interpretación de las pruebas de bombeo por el método de Rathod and Rushton, se obtuvieron coeficientes de almacenamiento que varían entre **0.01 y 0.0005**, en tanto los valores del rendimiento específico varían de **0.02 a 0.13**.

### **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recopilada como parte de las actividades de los estudios realizados en 1999 y 2004, además de registros históricos durante el periodo 1999-2020, obtenidos por el Organismo de Cuenca Península de Baja California. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2012-2019 que presenta la mayor y mejor distribución espacial.

### **5.4 Comportamiento hidráulico**

#### **5.4.1 Profundidad del nivel estático**

La configuración de profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 1 a 20 m, los cuales se incrementan del litoral costero hacia el este, conforme se asciende topográficamente a lo largo del cauce del río Guadalupe, hacia el cañón del arroyo La Zorra. Los niveles estáticos más someros, de 1 a 2 m, se registran en la zona más próxima a la costa, aguas abajo del puente “La Misión” de la carretera federal No.1 Rosarito-Ensenada; en tanto que las mayores profundidades, de 16 a 20 m, se presentan en la porción oriental del acuífero, entre los ranchos La Palma y Agua Caliente, hacia la zona de confluencia del arroyo La Zorra con el río Guadalupe (figura 4).

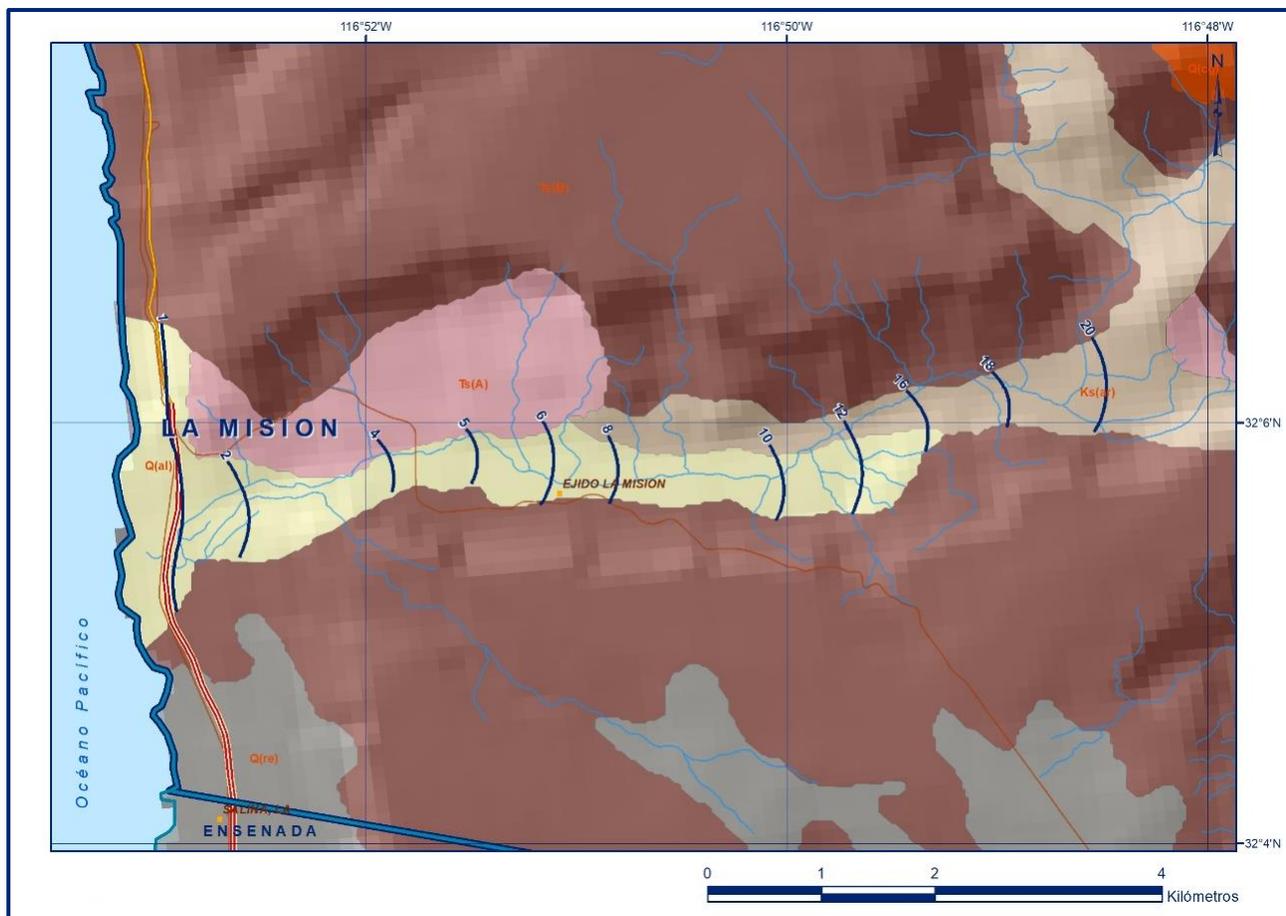


Figura 4. Profundidad del nivel estático en m (2019)

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1 a 7 msnm, que se incrementan de la zona costera hacia el este, por efecto de la topografía, al igual que la profundidad. Los valores más altos de carga hidráulica, 5 a 7 msnm, se registran en la porción oriental del acuífero, hacia la confluencia del arroyo La Zorra, desde donde descienden gradualmente hacia el oeste, en dirección hacia el mar, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo este-oeste, alimentada por los flujos procedentes del flanco norte (figura 5).

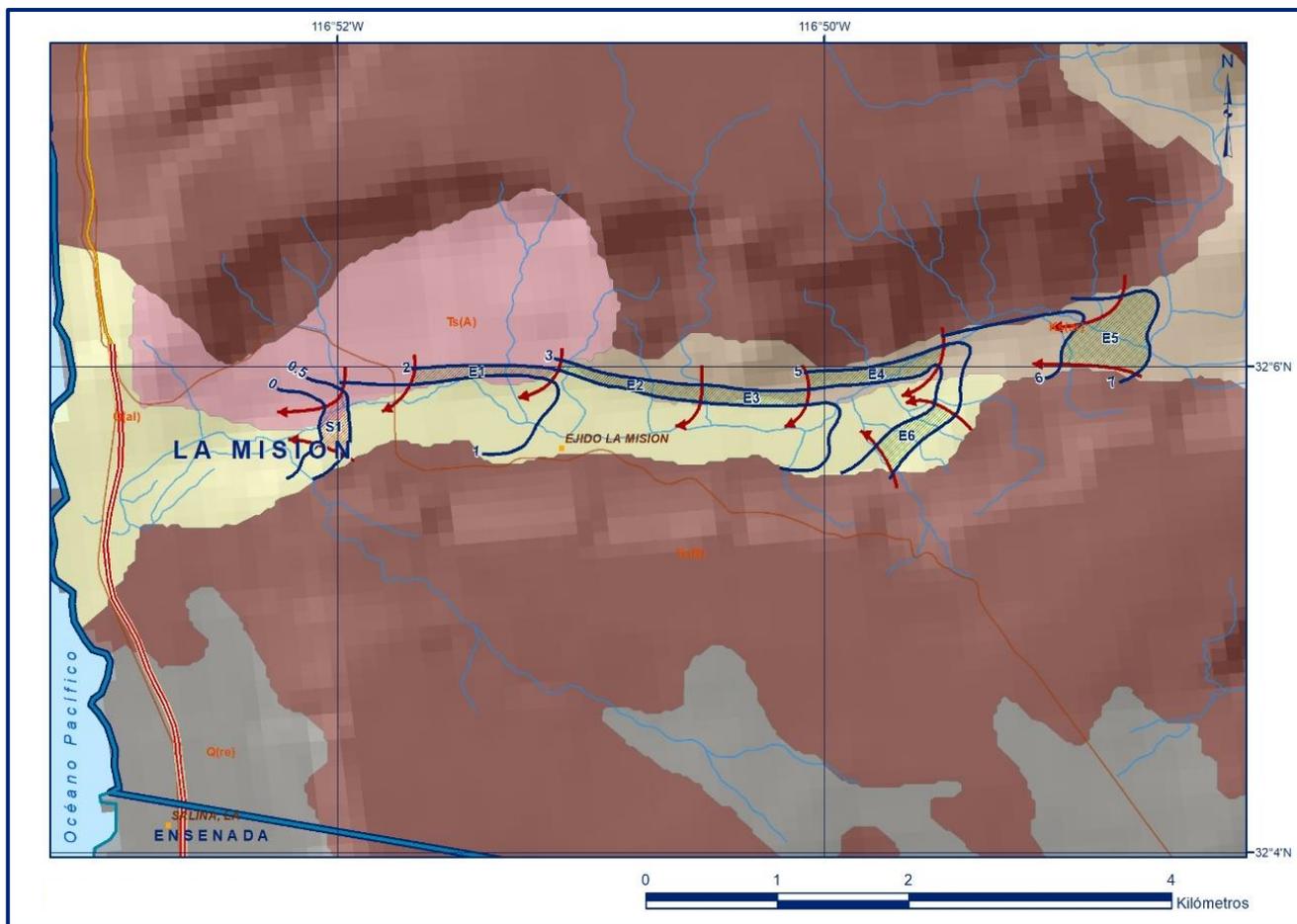


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2012-2019 registró valores de abatimiento en toda la superficie de explotación del acuífero, que varían de 1 a 6 m, que representan 0.1 a 0.9 m anuales. Los valores máximos, de 5 a 6 m, es decir de 0.7 a 0.9 m anuales, se registraron en la porción oriental del acuífero, entre los ranchos La Palma y Agua Caliente, desde donde descienden gradualmente hacia las laderas escarpadas del valle y hacia la zona costera, hasta ser nulos (figura 6).

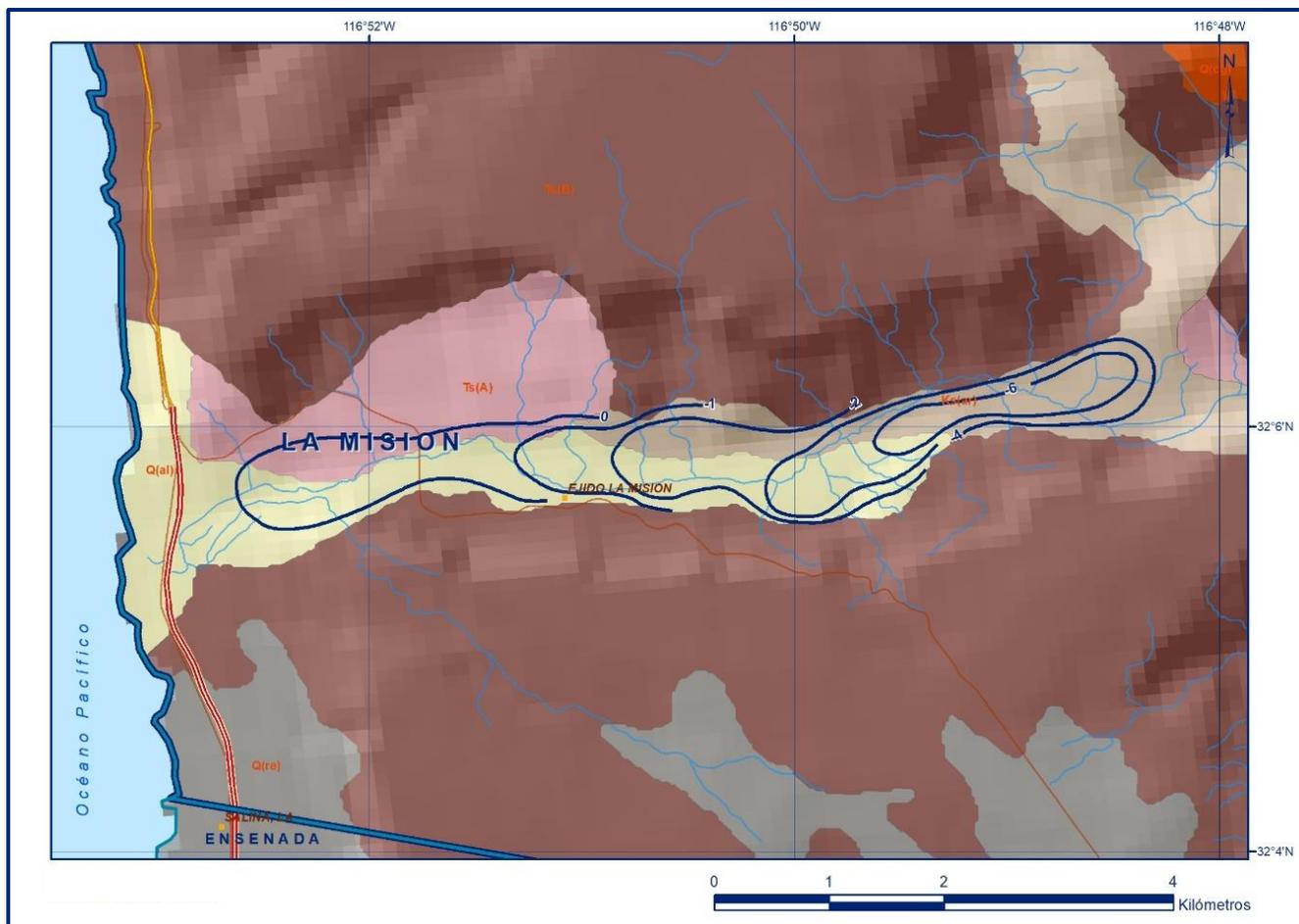


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2012-2019)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos realizados en 2000 y 2002 se tomaron muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para los análisis fisicoquímicos correspondientes. Las determinaciones de laboratorio incluyeron temperatura, pH, conductividad eléctrica, iones mayoritarios, salinidad, nitratos, y dureza total.

De los resultados de análisis fisicoquímicos a muestras de agua subterránea practicados en 2000 y 2002 (CONAGUA), se determina que los valores de concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 576 a 4690 mg/l, incrementándose desde la desembocadura del arroyo La Zorra con el río Guadalupe, hasta la zona costera. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a marina, de acuerdo con el criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 1000 a 7860  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad

eléctrica se registran en la zona costera en donde de manera inducida se produce una mezcla con el agua salina; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción oriental del acuífero. Ambos valores se incrementan gradualmente desde la porción oriental del acuífero hacia la zona costera, en la dirección del escurrimiento superficial del río Guadalupe.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica de manera general como de salinidad baja ( $C_1$ ) a alta ( $C_3$ ) y contenido bajo ( $S_1$ ) a medio ( $S_2$ ) de sodio intercambiable, que indican que no es apropiada para el de algunos cultivos que no sean tolerantes a la salinidad, en cuyo caso, se requerían lavados del suelo y suelos con buen drenaje. Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias clorurada-sódica, en la zona costera debido a su relación con el agua salina, y bicarbonatada-sódica que corresponde a agua de reciente infiltración, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

De manera general, el pH varía de 6.5 a 8.8 y los valores de temperatura de 15 a 28 °C. Se ha identificado hidrotermalismo y detectado por temperaturas de 40 a 50 °C en el agua subterránea de algunos aprovechamientos ubicados hacia la zona de confluencia del arroyo La Zorra, cuyo origen se puede explicar por la presencia de focos termales en las rocas del basamento.

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

De acuerdo con el censo más reciente realizado en el 2002, se registró la existencia de 134 aprovechamientos del agua subterránea de los cuales 102 son norias y 32 pozos; 83 se consideran activas y 51 inactivas. De las obras activas 63 son norias y 20 pozos: 49 para uso agrícola, 24 para uso doméstico-pecuario, 6 para uso público urbano (pozos de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada, CESPE, para abastecimiento de la ciudad de Ensenada), y 4 para otros usos.; cuyo volumen de extracción conjunto es de **7.6 hm<sup>3</sup> anuales**; de los cuales 1.1 hm<sup>3</sup> (14.5%) son para uso agrícola, 4.8 hm<sup>3</sup> (63.2%) uso público-urbano, 1.4 hm<sup>3</sup> (18.4 %) para usos múltiples y 0.3 hm<sup>3</sup> (3.9 %) para servicios.

## **7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2012-2019, en una superficie de **6.8 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.

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 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 del acuífero:

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

## **7.1 Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Debido a que el volumen de agua para público-urbano se conduce a Ensenada, solo se considera la recarga incidental ocasionada por el riego agrícola.

### **7.1.1 Recarga vertical (Rv)**

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

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

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

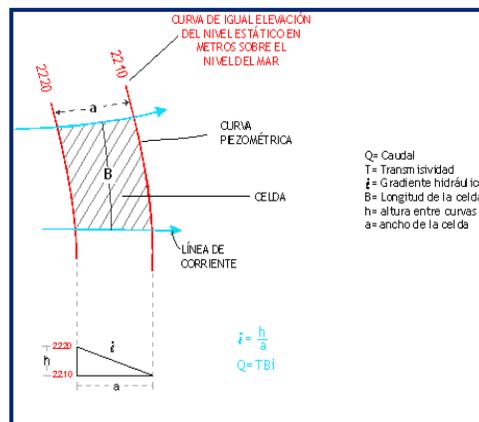
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q:** Caudal ( $m^3/s$ )
- T:** Transmisividad ( $m^2/s$ )
- B:** Longitud de la celda (m)
- i:** Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **5.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	376	133	0.5	0.00376	0.0020	0.0028	0.1
E2	927	89	1	0.01124	0.0020	0.0208	0.7
E3	946	107	1	0.00935	0.0030	0.0265	0.8
E4	703	123	1	0.00813	0.0030	0.0171	0.5
E5	880	140	2	0.01429	0.0030	0.0377	1.2
E6	438	460	1	0.00217	0.0150	0.0143	0.5
E7	550	177	2	0.01130	0.0080	0.0497	1.6
<b>TOTAL</b>							<b>5.4</b>

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

### 7.1.3 Recarga Incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se considera que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la zona agrícola, la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo y la práctica de riego por gravedad. Tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 1.1 hm<sup>3</sup> de agua subterránea; al aplicar el 20% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 0.2 hm<sup>3</sup>. Por tanto, **Rr = 0.2 hm<sup>3</sup> anuales.**

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B) y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) hacia el mar y por evapotranspiración (ETR) en la zona de niveles freáticos someros.

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **7.6 hm<sup>3</sup> anuales.**

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

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2018, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **0.3 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por el flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	371	196	0.5	0.00255	0.010	0.0095	0.3
<b>TOTAL</b>							<b>0.3</b>

### 7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación.

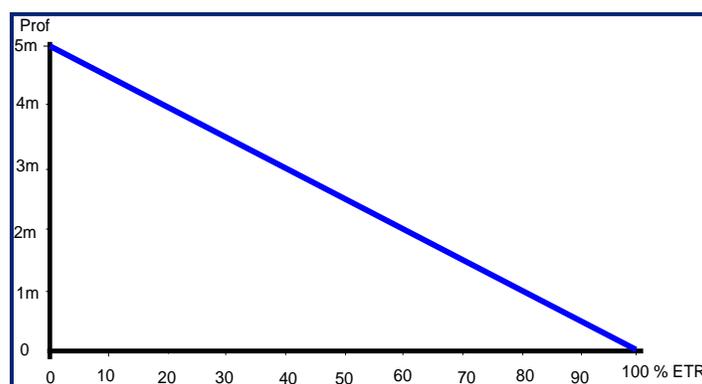
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 17.0 °C y 310 mm, representativos de la superficie aluvial donde se aloja el acuífero. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 309.7 mm anuales, como se muestra a continuación.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	17		
P(mm) =	310	P <sup>2</sup> =	96100
L =	970.65	L <sup>2</sup> =	942161.423
ETR (mm)	309.7		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso. En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100%, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 0.6hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
4 a 5	4.5	0.31	0.3097	5.0	0.1	0.0
2 a 4	3	0.65	0.3097	5.0	0.4	0.1
2 a 1	1.5	0.84	0.3097	5.0	0.7	0.2
0 a 1	0.5	1.00	0.3097	5.0	0.9	0.3
<b>TOTAL</b>		<b>2.8</b>				<b>0.6</b>

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2012-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y = 0.1$ , se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de  $6.8 \text{ km}^2$ , mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

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

**A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

**h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle del cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de  $-1.4 \text{ hm}^3$ , es decir, un promedio anual de  $-0.2 \text{ hm}^3$ .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2012-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área ( $\text{km}^2$ )	$S_y$	$\Delta V(S)$ ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )
-6	-6.0	0.6	0.1	-0.4
-4 a -6	-5.0	1.0	0.1	-0.5
-2 a -4	-3.0	0.9	0.1	-0.3
-1 a -2	-1.5	0.5	0.1	-0.1
0 a -1	-0.5	1.3	0.1	-0.1
	<b>TOTAL</b>	<b>4.3</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-1.4</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>-0.2</b>

### Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 7.6 + 0.3 + 0.6 - 0.2 - 5.4 - 0.2$$

$$R_v = 2.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_r \\ R &= 2.7 + 5.4 + 0.2 \\ R &= 8.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 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:

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **8.3 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 del acuífero La Misión, la descarga natural comprometida es 0.3 hm<sup>3</sup> anuales que corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar que debe conservarse para mantener la posición de la interface marina, **DNC = 0.3 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 **7,528,134 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 del 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 8.3 - 0.3 - 7.528134 \\ \text{DMA} &= 0.471866 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **471,866 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **9 BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1999. Estudio de Simulación Hidrodinámica de los Acuíferos Tijuana y La Misión, Baja California. Realizado por Consultores en Agua Subterránea, S.A.