

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Guadalupe (0207),
Estado de Baja California***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE BAJA CALIFORNIA							
0207	GUADALUPE	26.4	1.4	37.213155	34.7	0.000000	-12.213155

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO GUADALUPE (0207), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA***

México, D.F., septiembre de 2013

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	2
1.1 Localización	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1. Provincias fisiográficas	6
3.2. Clima	6
3.3. Hidrografía	7
3.4. Geomorfología	7
4. GEOLOGÍA	8
4.1 Estratigrafía	8
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo	12
5. HIDROGEOLOGÍA	12
5.1. Tipo de acuífero	12
5.2. Parámetros hidráulicos	13
5.2 Piezometría	13
5.3 Comportamiento hidráulico	13
5.3.1 Profundidad al nivel estático	13
5.3.2 Elevación del nivel estático	16
5.3.3 Evolución del nivel estático	19
5.4. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
7.1. Entradas	23
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	23
7.1.3. Recarga inducida (Ri)	26
7.2. Salidas	26
7.2.1 Evapotranspiración (ETR)	26
7.2.2. Bombeo (B)	28
7.2.3. Flujo subterráneo horizontal (Sh)	28
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)	29
8. DISPONIBILIDAD	30
8.1. Recarga total media anual (Rt)	30
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	30
8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)	30
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)	31
9. BIBLIOGRAFÍA	31

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Guadalupe, definido con la clave 0207 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (SIGMAS), se localiza en la porción noroccidental del estado de Baja California, entre los paralelos 31°59' y 32°15' de latitud norte y los meridianos 116°05' y 116°44' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 976 km².

Limita al norte con el acuífero Las Palmas, al este con Real del Castillo, al sur con Ensenada y al oeste con La Misión, todos ellos e el Estado de Baja California (figura 1).

Geopolíticamente el acuífero se localiza en su mayor parte en el municipio Ensenada, sólo una pequeña porción de su extremo norte se ubica en el municipio Tecate.

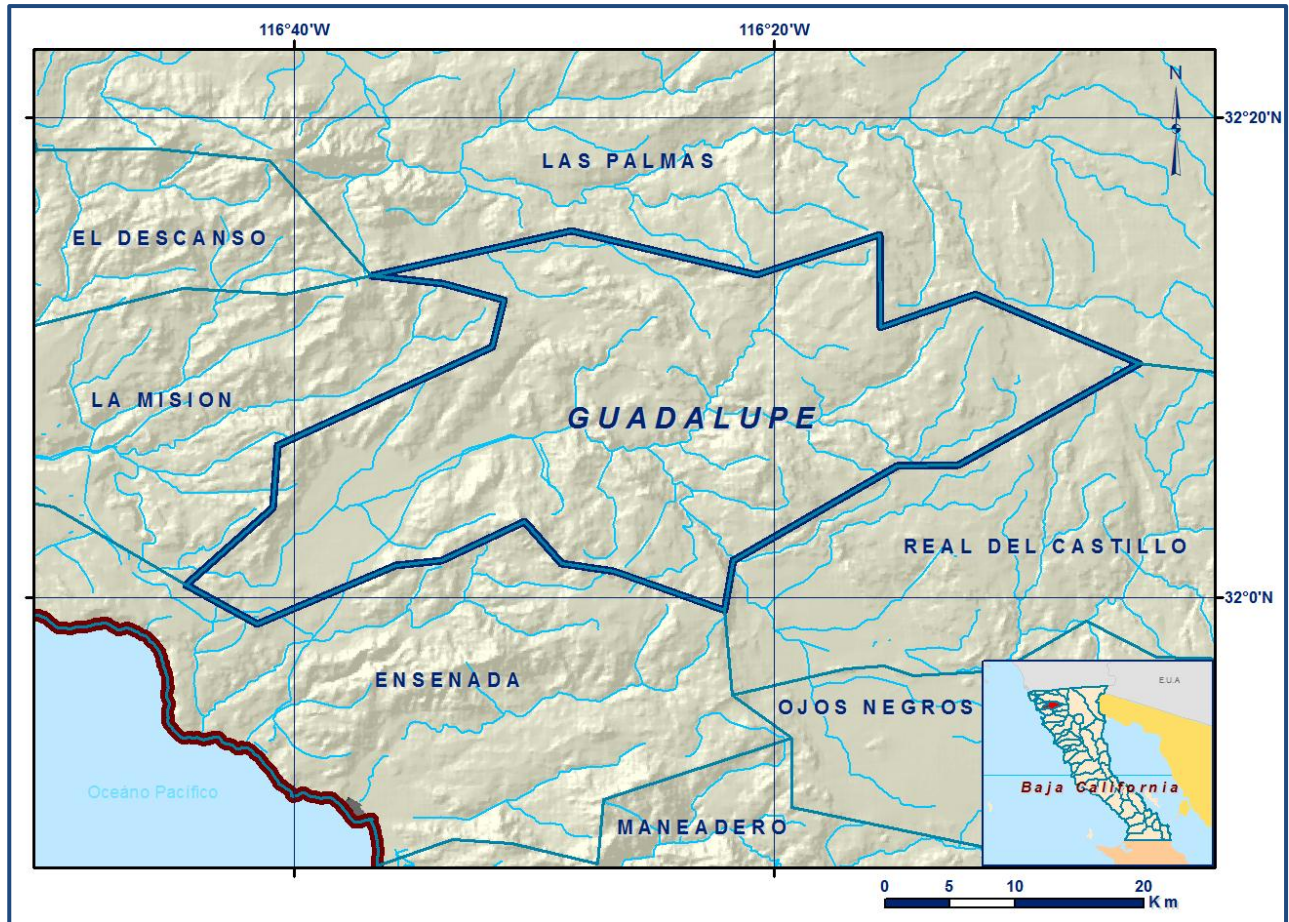


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 0207 GUADALUPE

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	116	21	41.7	32	1	33.2
2	116	22	4.4	31	59	27.9
3	116	26	39.2	32	1	4.7
4	116	28	52	32	1	24.9
5	116	30	23.8	32	3	10.9
6	116	33	52.7	32	1	32.6
7	116	35	46.7	32	1	20.9
8	116	41	32.7	31	58	52.8
9	116	44	30.6	32	0	31.5
10	116	40	54	32	3	43.6
11	116	40	42.1	32	6	19.9
12	116	31	45.4	32	10	26.9
13	116	31	15	32	12	24
14	116	33	48.1	32	13	4.4
15	116	36	48.2	32	13	24.3
16	116	28	26.4	32	15	17.7
17	116	20	42.8	32	13	27.7
18	116	15	35.9	32	15	8.1
19	116	15	34.5	32	11	16.4
20	116	11	36.8	32	12	38.6
21	116	4	46	32	9	45.5
22	116	12	19.3	32	5	30.5
23	116	14	52.9	32	5	29.9
1	116	21	41.7	32	1	33.2

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Guadalupe pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California. Su territorio se encuentra completamente vedado, sujeto a las disposiciones del “*Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de Mayo de 1965. Esta veda 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 2013, el municipio Ensenada se clasifica como zona de disponibilidad 4 y el municipio Tecate como zona de disponibilidad 3.

El uso principal del agua es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna. En el acuífero está constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Valle de Guadalupe, A.C., instalado el 28 de octubre de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios geohidrológicos, entre los cuales los más importantes se mencionan a continuación:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES EL MÉDANO Y EL DESCANSO EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, realizado para la Comisión Nacional del Agua por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. en 1979. En este estudio se identificaron 3 unidades geohidrológicas que se agruparon en baja, media y alta permeabilidad. Se tomaron 13 muestras de agua en El Descanso para análisis fisicoquímico, determinando que el agua por los iones predominantes es de tipo mixta-clorurada. Las concentraciones de sólidos totales disueltos fueron menores a 1000 ppm y sólo una muestra superó las 1500 ppm. La profundidad al nivel estático variaba de 1 a 6 m, predominando los valores de 3 a 5 m, en tanto que los valores de elevación del nivel estático variaban de 2.5 a 9.0 msnm, registrándose las menores elevaciones en las porciones central y occidental y las mayores hacia el extremo oriental. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, se planteó el balance de aguas subterráneas. El estudio concluye que el potencial del valle El Descanso era de 1.9 hm³ anuales y que la calidad química del agua era, en general, apta para todo uso.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO GUADALUPE, B.C. Realizado por Desarrollo y Sistemas, S.A. para la Comisión Nacional del Agua en 1999. Sus objetivos principales fueron determinar la magnitud de las componentes de la ecuación de balance de aguas subterráneas para conocer su disponibilidad; proponer el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero considerando la distribución espacial de los parámetros hidráulicos y su geometría; elaborar un modelo tridimensional de simulación hidrodinámica utilizando el código numérico Visual MODFLOW y diseñar una red de monitoreo de niveles del agua subterránea.

ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO 0207 GUADALUPE, MUNICIPIO DE ENSENADA, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, 2008. Realizado por Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S, A. de C.V. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero, conocer su funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Como parte de sus actividades de campo incluyeron censo de aprovechamientos,

piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos.

Este estudio fue 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. Provincias fisiográficas

La superficie cubierta por el acuífero pertenece a la Provincia Fisiográfica de Baja California (Raisz, 1964), subprovincia Sierra de Juárez. Esta última se considera la continuación meridional del Complejo Cristalino de la Sierra Nevada que aflora en California (USA) y se caracteriza por ser una gran masa de rocas graníticas limitada al este por un corte repentino (probablemente un escarpe de falla) hacia la depresión Saltón (E. López Ramos, 1979). En términos generales la Sierra de Juárez puede describirse como una gran faja elevada, inclinada hacia el oeste, dividida en una serie de cadenas montañosas paralelas que incluyen a las sierras San Jacinto y Santa Rosa en California (USA) y las sierras Juárez y San Pedro Mártir en Baja California.

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI (1977), el acuífero Guadalupe se encuentra ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Sierras de Baja California Norte. La parte central de la provincia está integrada por la cordillera peninsular que atraviesa los estados de Baja California y Baja California Sur, en dirección noroeste-sureste; también forman parte de esta provincia las sierras de Juárez, San Pedro Mártir y La Giganta.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en el acuífero es templado (Cs), representado por los subtipos Csa(e) con lluvias en invierno, clima mediterráneo, verano cálido poco extremo y Csb(e) que domina en las partes topográficamente más altas, con lluvias invernales, verano fresco poco extremo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 3 estaciones: Olivares Mexicanos, Agua Caliente y Carmen Serdán. Con los datos de estas estaciones y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **295 mm** y **16.8° C**, respectivamente. Por otra parte, el valor medio de la evaporación potencial es de **1618 mm** anuales.

3.3. Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 1 Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, cuenca del Río Tijuana-Arroyo Maneadero. El área perteneciente al acuífero se encuentra integrada por arroyos de tipo intermitente que tienen su origen en las montañas que rodean al valle. La red de drenaje forma tributarios de primer y segundo orden principalmente, que se integran formando el cauce principal del Arroyo Guadalupe, el cual continúa su curso a través en el extremo noroccidental del acuífero La Misión para finalmente desembocar en el Océano Pacífico.

La cuenca del Arroyo Guadalupe tiene una superficie de 2434 km² y no cuenta con infraestructura para el aprovechamiento de los escurrimientos. El arroyo tiene una longitud total de 115 km, desde su origen hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Es una corriente intermitente que tiene como tributarios a los arroyos El Barbón, Cañón del Burro y Agua Escondida.

3.4. Geomorfología

El acuífero se ubica en un valle intermontano próximo al Océano Pacífico, con elevaciones que varían entre los 300 y 400 msnm, rodeado por montañas cuyas alturas varían entre los 500 y los 700 msnm. En la porción oriental del valle, se encuentra la cadena montañosa de mayor altura, conocida como Sierra Blanca, con elevaciones de hasta 1,300 msnm. Al sur se ubican los cerros Pedregoso y Mogor que alcanzan elevaciones máximas de 700 msnm.

El intemperismo y la erosión superpuestos sobre los sistemas de fracturamiento que se presentan en las rocas prebatolíticas (volcánicas y metamórficas) producen patrones de tipo dendrítico, subdendrítico y subparalelo, éste último identificado por los tributarios que llegan al colector principal en ángulo casi recto, ya que están gobernados por el sistema de fracturamiento NW-SE. Debido a que las rocas batolíticas están afectadas por estructuras geológicas similares a las identificadas en las rocas prebatolíticas, presentan patrones de drenaje semejantes. En este caso, las rocas intrusivas (tonalitas y granitos) presentan patrones de tipo subparalelo y subdendrítico, que en algunas regiones, como en la zona de la Sierra Blanca, adquiere características de avenamiento rectangular por efecto del control que ejerce el fracturamiento que las afecta.

El desarrollo geomorfológico de la región es complejo, debido a una serie de procesos tectónicos, volcánicos y sedimentarios que determinan la actual conformación geomorfológica. Como resultado de los procesos geológicos se ha desarrollado una serie de regiones geomorfológicas. Dentro de la región del Valle de Guadalupe y su cuenca superficial, es posible distinguir una de ellas que consiste en superficies de erosión del Cretácico Tardío y Terciario Temprano que presentan buzamientos hacia el oeste-suroeste y que en su región noreste, cerca del escarpe del Golfo, constituyen las porciones topográficas de mayor elevación en la Península de Baja California.

4. GEOLOGÍA

Las formaciones geológicas expuestas en el acuífero están representadas por rocas ígneas intrusivas (tonalitas, granodioritas, gabros), rocas metamórficas (gneis, esquistos y pizarras), tobas de composición riolítica, así como depósitos sedimentarios granulares de origen aluvial, fluvial y lacustre (figura 2).

El material granular está representado por sedimentos de granulometría variada localizados sobre los cauces de los arroyos y la zona de planicie, producto de la erosión e intemperismo de las rocas preexistentes que circundan el acuífero.

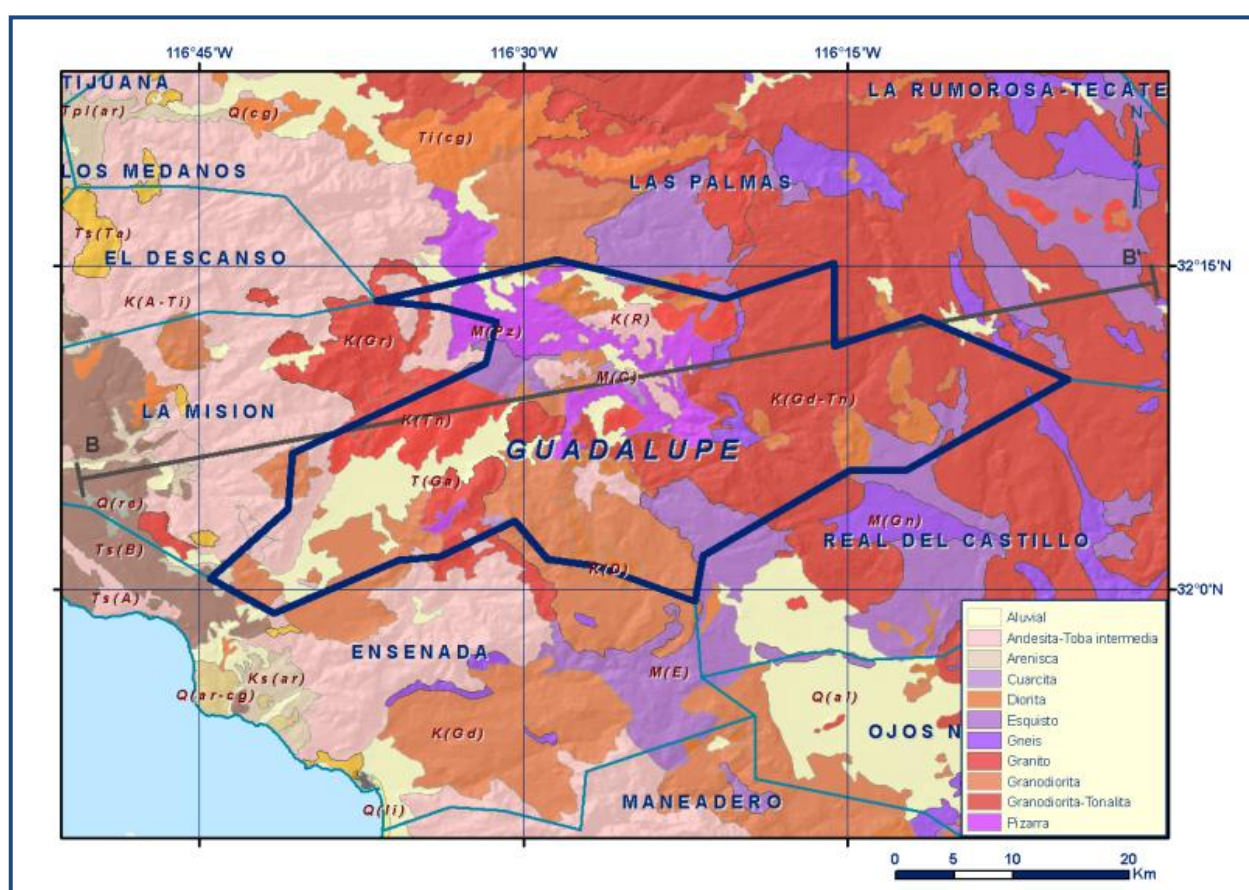


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En el acuífero aflora una variedad de rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo rango estratigráfico varía del Triásico al Reciente. En la porción central y oriental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace

una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas. La columna estratigráfica se describe a continuación:

Formación Rancho Vallecitos

Representa una secuencia sedimentaria de tipo Flysch, de edad Triásico Superior-Jurásico Medio, constituida por lutitas y areniscas, con lentes de caliza marmorizada y conglomerados. Las rocas presentan metamorfismo de facies esquistos verdes. En el contacto de los cuerpos intrusivos del Cretácico con los lentes de caliza de la secuencia flysch, es frecuente encontrar skarns de tungsteno con granate. Se correlaciona con las formaciones French Valley, Bedford Canyon y Esquistos Julián del Triásico Superior.

Formación Alisitos.

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias 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. Esta formación se encuentra deformada y parcialmente metamorfizada, está afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de numerosos cuerpos graníticos del Cretácico. Se encuentra subyaciendo en forma discordante a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. 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.

Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y 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 el 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. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Formación Rosario

Formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación 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 (lower sandstone member, LSS), (b) miembro lodolítico medio (middle mudstone member, MM) y (c) miembro conglomerático-arenoso superior (upper sandstone-conglomerate member, USS). Los tres miembros 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 concuerda 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, y subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas ubican estratigráficamente a la Formación Rosario en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Se ha calculado que su espesor máximo es de 750 m.

Formación Rosarito Beach

Esta formación ha sido subdividida por Ashby (1989) en diez miembros distintos, cinco de los cuales se encuentran en la Subcuenca de Tijuana y los otros cinco en la Subcuenca La Misión.

Los afloramientos actuales de rocas de la Cuenca Rosarito Beach se encuentran limitados al este por los terrenos batolíticos y pre-batolíticos 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 manera general, está constituida por intercalaciones de basaltos, tobas y brechas que afloran en las subcuencas Rosarito y Tijuana. De la base a la cima, los cinco miembros de la subcuenca Tijuana corresponden a depósitos sedimentarios y volcánicos.

- Base: predominan sedimentos de plataforma con intercalaciones delgadas de derrames basálticos con horizontes de toba.
- Cima: compuesto principalmente por derrames de lava con intercalaciones de arenisca, toba y limonita.
- Hiato: persistió hasta el Plioceno, dando lugar a depósitos aislados de cuenca, los cuales forman dos unidades pertenecientes a la Formación San Diego, constituida por dos miembros: Miembro Inferior formado por areniscas de grano fino a medio, con lentes de conglomerado, de coloración amarillenta; el Miembro Superior está constituido por areniscas de grano medio, con intercalaciones de conglomerado que hacia la cima son más frecuentes y de constitución más gruesa.

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 W 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.

Depósitos aluviales

Afloran en la parte baja de la cuenca, a lo largo del cauce del Arroyo Guadalupe y otros arroyos tributarios. Están conformados por arenas de grano medio a fino, redondeadas, producto de la erosión de las rocas ígneas y metamórficas. Presentan alto contenido de cuarzo.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente, el acuífero se aloja en el relleno aluvial depositado sobre una fosa tectónica, resultado de un fallamiento normal. Esta fosa está integrada por dos depresiones adyacentes llamadas “fosa Calafia”, localizada al noreste, y “El Porvenir” al suroeste. Las fosas se delimitan por un sistema de fallas estructurales que a través de fracturas recargan al acuífero.

La estratificación en las rocas sedimentarias del Cretácico Superior y Neógeno presenta echados hacia el suroeste; como resultado de intrusiones múltiples que se originaron en el Cretácico. La estructura más notoria es la falla San Miguel-Vallecito, que presenta un desplazamiento lateral derecho con rumbo noroeste-sureste, relacionado con el régimen tectónico del sistema San Andrés–

Golfo de California. En el área del valle de Guadalupe se presentan una serie de fallas normales escalonadas con caída hacia el noroeste, que indican parte de una cuenca estructural (SGM, 1997).

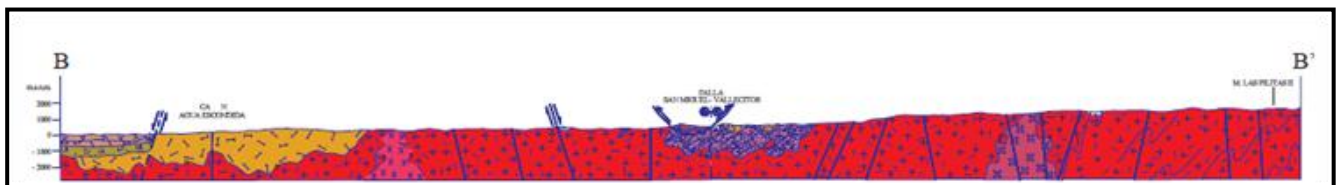
La región se caracteriza por una gran diversidad de estructuras geológicas entre las cuales pueden mencionarse las fallas normales, las fracturas de diferentes dimensiones, así como aparatos y derrames volcánicos y grandes cuerpos intrusivos. También existen pliegues en rocas sedimentarias que son el producto de su deformación plástica y foliación en las rocas metasedimentarias, con rumbo predominante noroeste-suroeste con echados al noreste y suroeste.

El rasgo estructural regional más significativo lo constituye, sin duda, el sistema de fallas que conforma el límite oriental de la sierra con las llanuras del desierto sonorense que han producido los escarpes abruptos orientales de las sierras La Rumorosa, Juárez y San Pedro Mártir.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial de granulometría variada y conglomerados; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3). Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias

La fosa “Calafia” geoméricamente es de forma cónica triangular con una profundidad de aproximadamente 350 m y la fosa “El Porvenir” presenta una forma ovalada en planta, con una profundidad aproximada de 100 m.



Fuente: Carta Geológica-Minera I11-11 “Tijuana” Esc. 1:250,000 (SGM, 2003)
Figura 3. Sección geológica esquemática NE-SW.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar 350 m en la “fosa Calafia”

y 100 m en la “fosa El Porvenir”. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Se identifica la presencia de tres unidades hidrogeológicas: materiales granulares no consolidados, conglomerados semiconsolidados y macizos rocosos, que por su permeabilidad se consideran permeables, semipermeables e impermeable, respectivamente.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en el 2008, se realizaron 4 pruebas de bombeo tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 7 a 16 horas. De su interpretación por métodos convencionales se determina que los valores de **transmisividad** varían de **4.5 a 13.3 x10⁻³ m²/s**; en tanto que la **conductividad hidráulica** oscila entre **5.6 y 13.3 x10⁻⁵ m/s**. En dos de las pruebas fue posible contar con pozo de observación; el valor promedio del coeficiente de almacenamiento, o **rendimiento específico** en este caso, fue de **0.065**.

5.2 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada en los años 1990, 1998, 2008 y 2009. En la actualidad se tiene una red de pozos para el monitoreo sistemático de los niveles del agua subterránea.

5.3 Comportamiento hidráulico

5.3.1 Profundidad al nivel estático

Para 1990 en la fosa “Calafia” las profundidades variaban entre 3 y 20 m, desde el poblado Francisco Zarco hacia la entrada del Arroyo El Burro, conforme se asciende topográficamente; hacia La Casita se registran los valores más someros, menores de 5.0 m. Al centro de la fosa, las profundidades varían entre 7 y 13 m. En la fosa “El Porvenir” los niveles variaban entre 2 y 23 m; en la mayor parte de ella se registraron valores que variaron de 5 a 7 m (figura 4).

Para 1998, en general el comportamiento de los niveles estáticos de la fosa “Calafia” mostró una recuperación, los valores extremos fueron de 1 a 8.5 m. Lo mismo pasó en la fosa “El Porvenir”, registrando ahora valores extremos de 1 a 8 m. Al centro de la fosa las profundidades variaban de 3 a 5 m (figura 5).

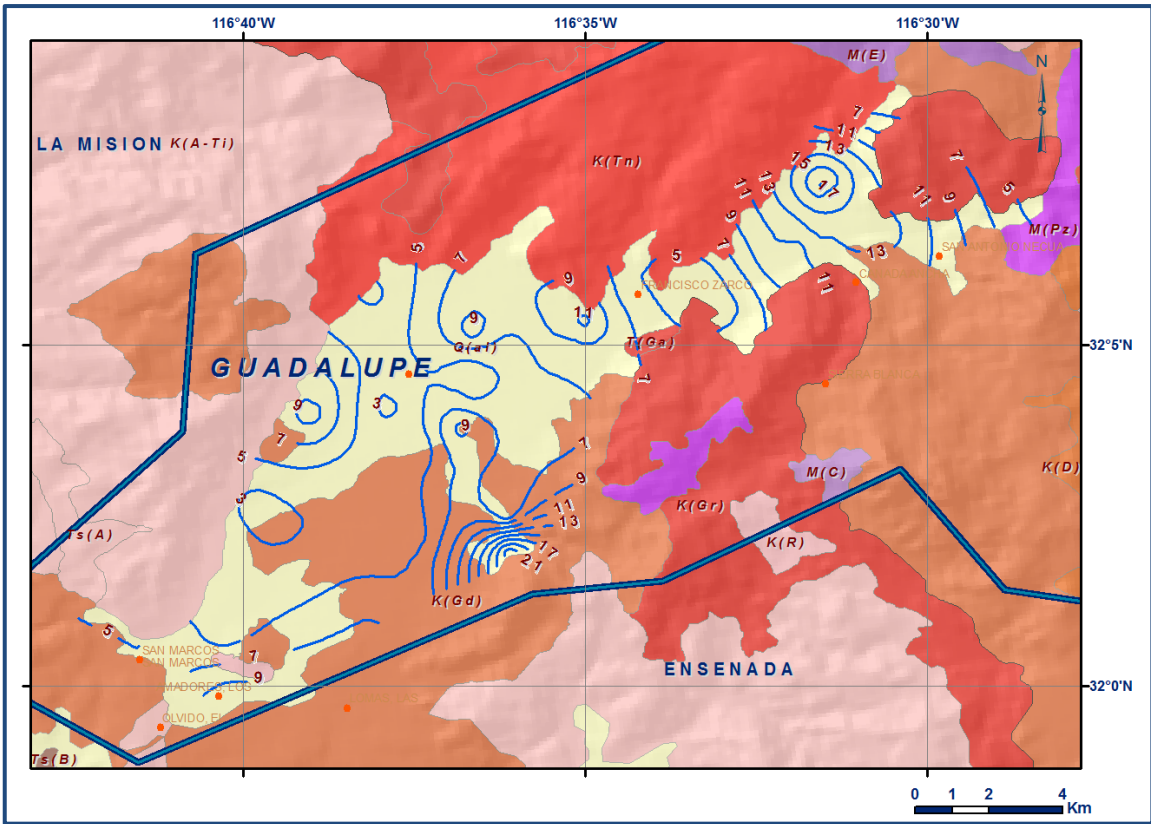


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m, 1990

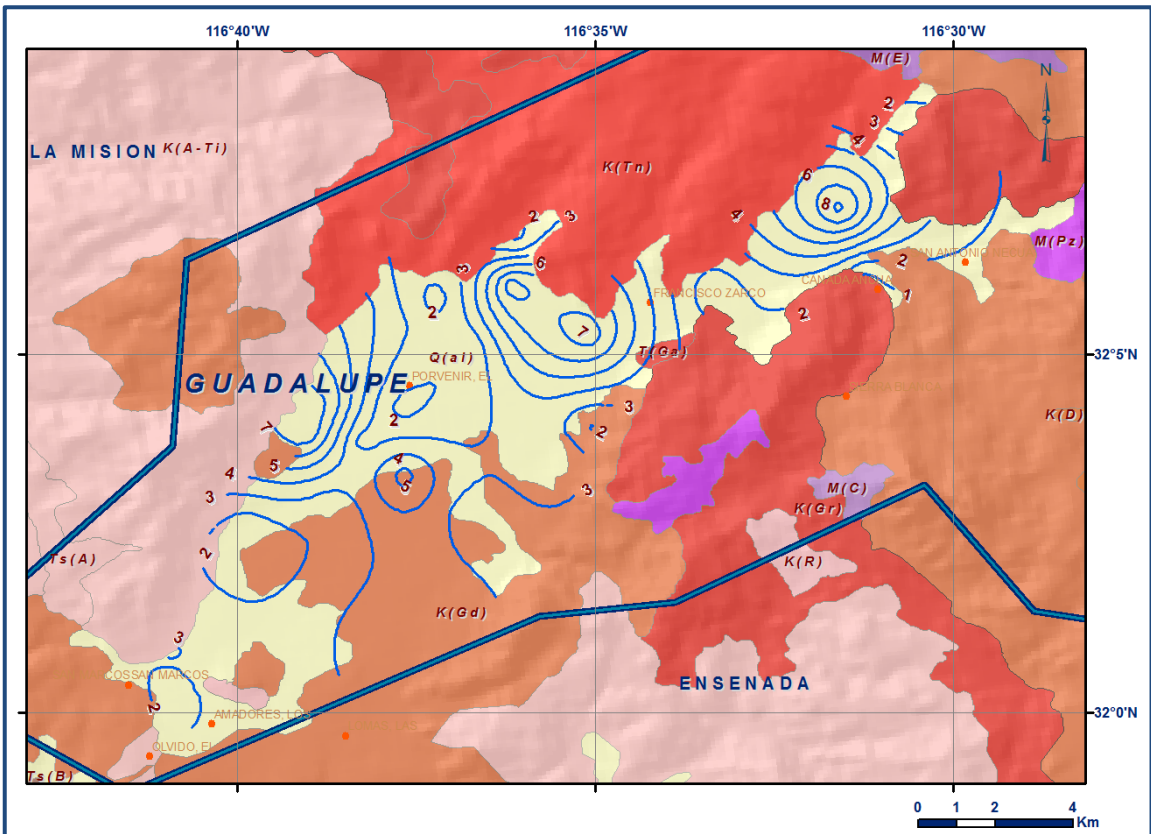


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m, 1998

Para el 2008 se observa un descenso drástico en los niveles del agua subterránea en ambas fosas, como consecuencia de un periodo de estiaje. En la fosa “Calafia”, se registraron valores de 3 a 42 m, con los mayores descensos en la porción central. Para la fosa “El Porvenir” se registraron valores de hasta 13 m y en la porción central de 4 a 10 m (figura 6).

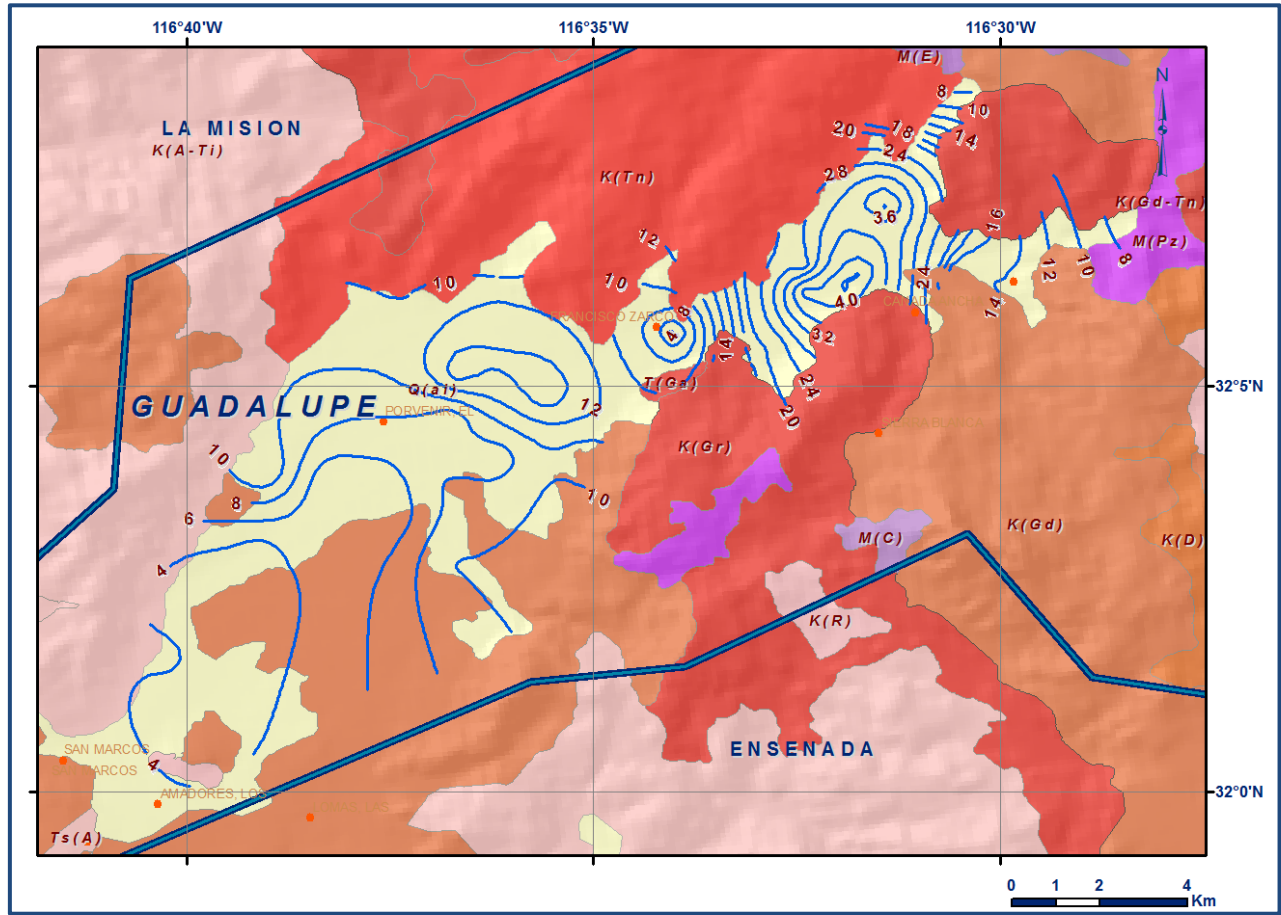


Figura 6. Profundidad al nivel estático en m, 2008

En 2009, se registraron valores extremos de 4 y 45 m, los más profundos en el centro de la fosa “Calafia”. Para la fosa “El Porvenir” en general los niveles se mantuvieron con respecto al año anterior (figura 6).

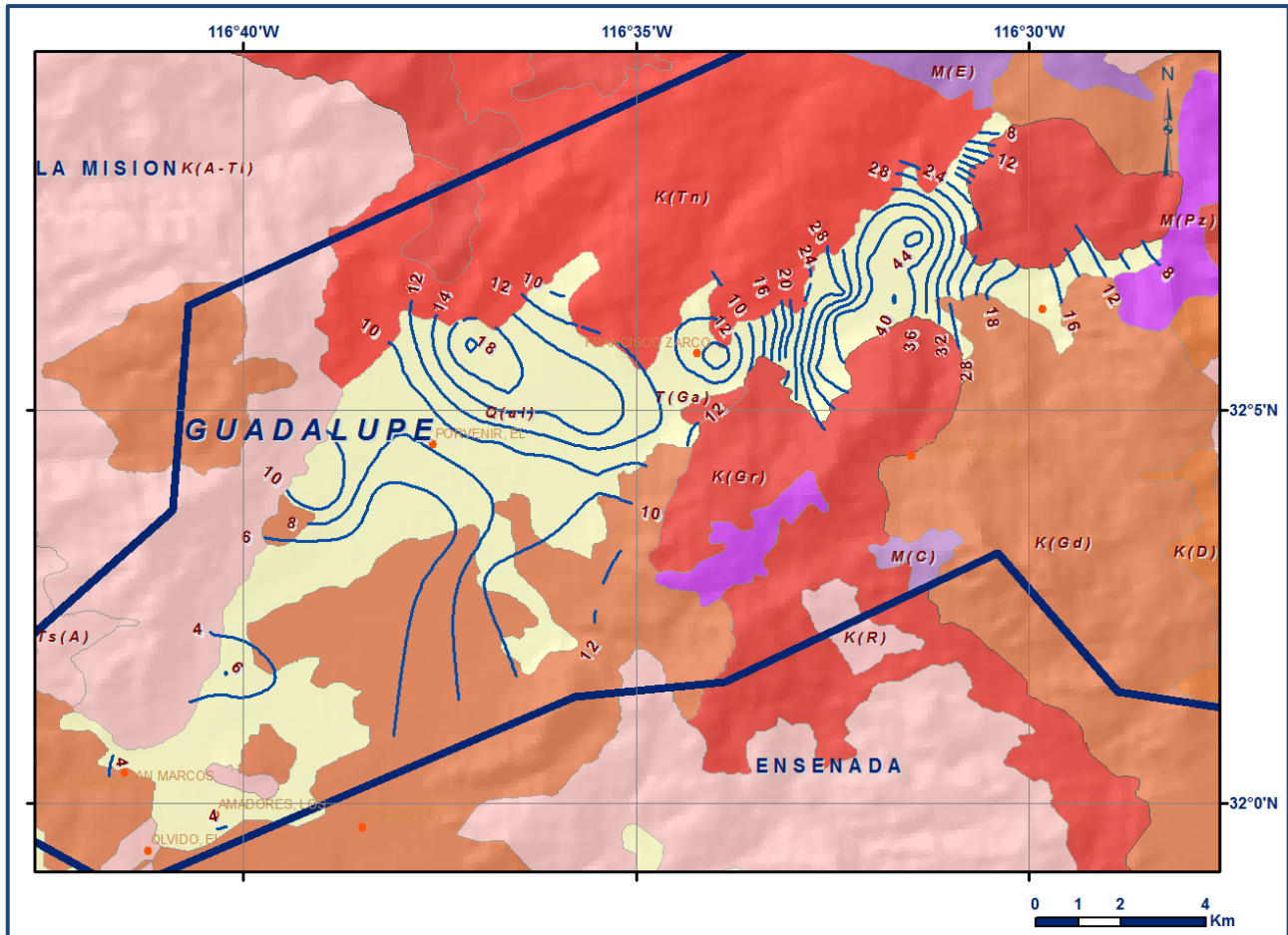


Figura 7. Profundidad al nivel estático (m), 2009

5.3.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para 1990, mostrada en la figura 8, los valores muestran, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía, incrementándose gradualmente conforme se asciende a lo largo del cauce del arroyo Guadalupe. Para la fosa “Calafia” los valores varían de 328 a 390 msnm y de 287 a 372 msnm en la fosa “El Porvenir”. De esta manera, se define la dirección preferencial del flujo subterráneo de noreste a suroeste.

Para 1998 la dirección preferencial del flujo subterráneo presenta la misma orientación y los valores de elevación muestran la recuperación observada en la profundidad al nivel estático. Para la fosa “Calafia” se registraron valores extremos de 336 a 392 msnm y para la fosa “El Porvenir” de 284 a 350 msnm (figura 9).

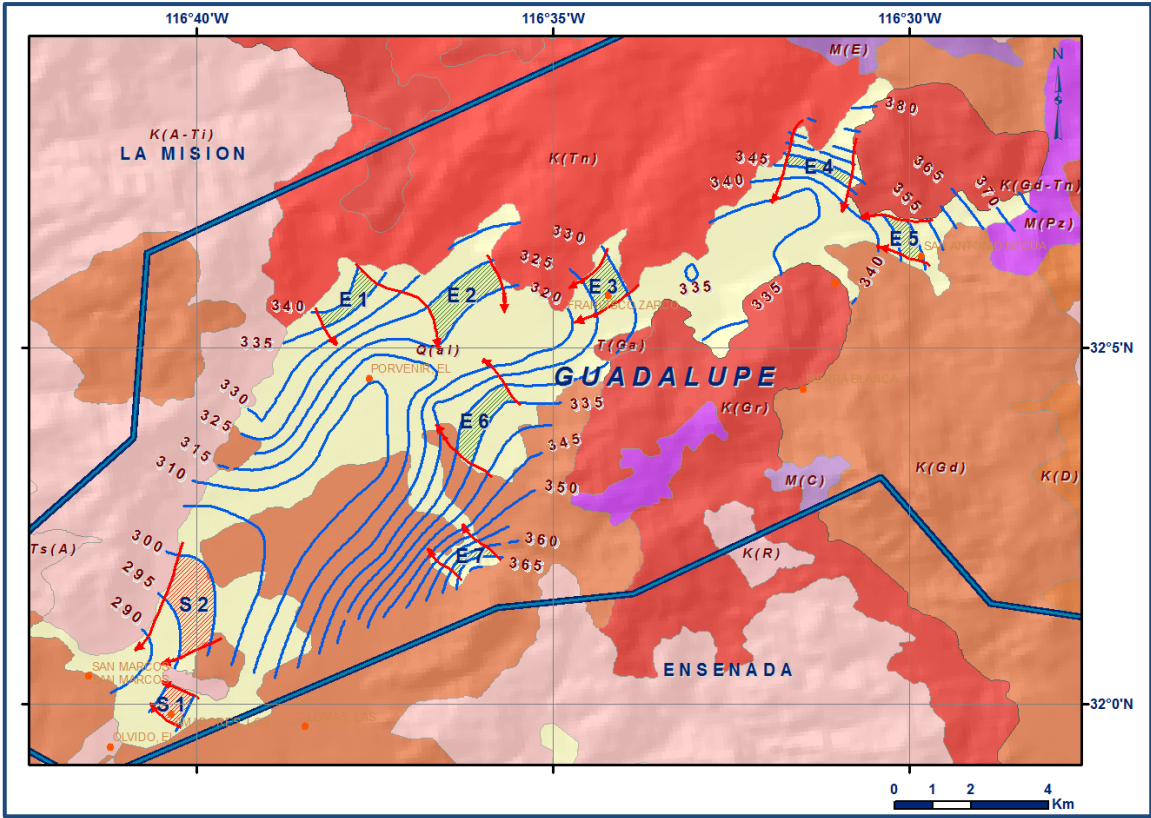


Figura 8. Elevación del nivel estático (msnm), 1990

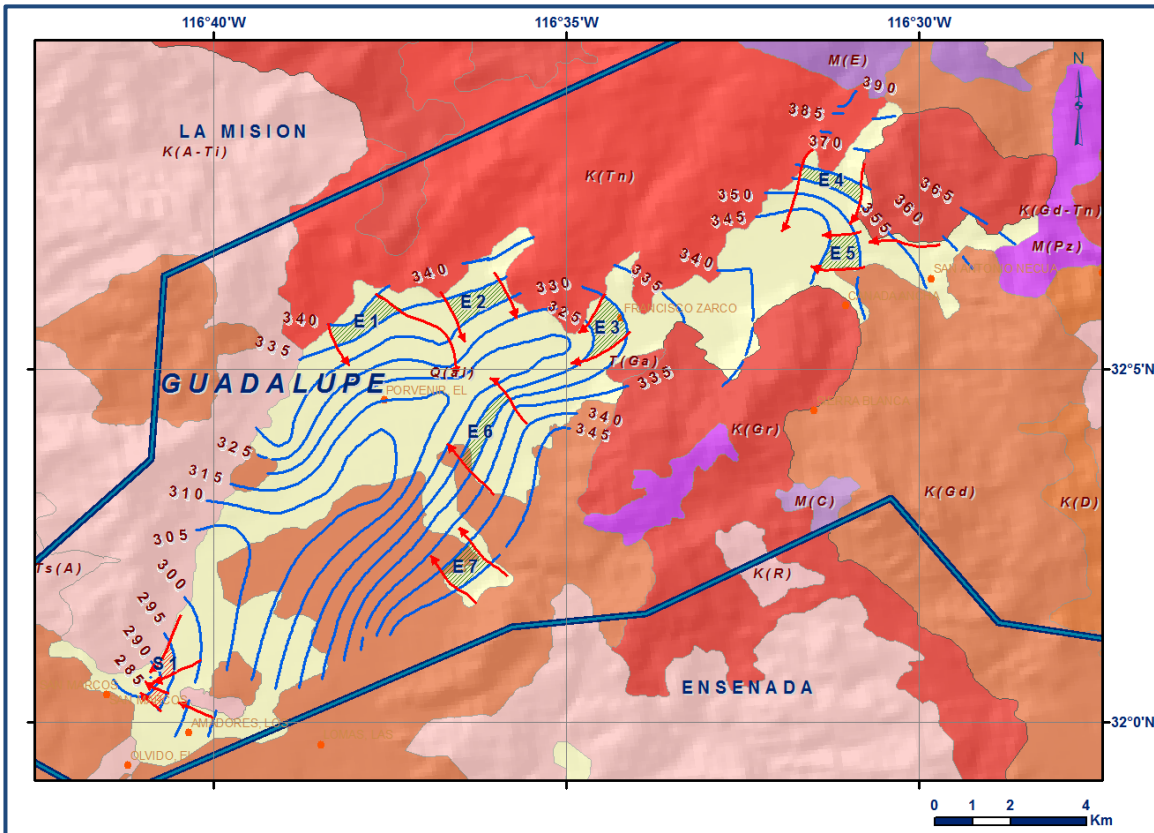


Figura 9. Elevación del nivel estático (msnm), 1998

Para 2008 la configuración de elevación manifiesta recuperaciones de los niveles piezométricos; para la fosa “Calafia” varía de 299 a 388 msnm y 289 a 341 msnm en la fosa “El Porvenir”, el sentido del flujo subterráneo presenta la misma dirección de noreste a suroeste con una ligera alteración en la fosa “La Calafia”, causada por la extracción de los pozos del organismo operador de la ciudad de Ensenada CESPE (figura 10).

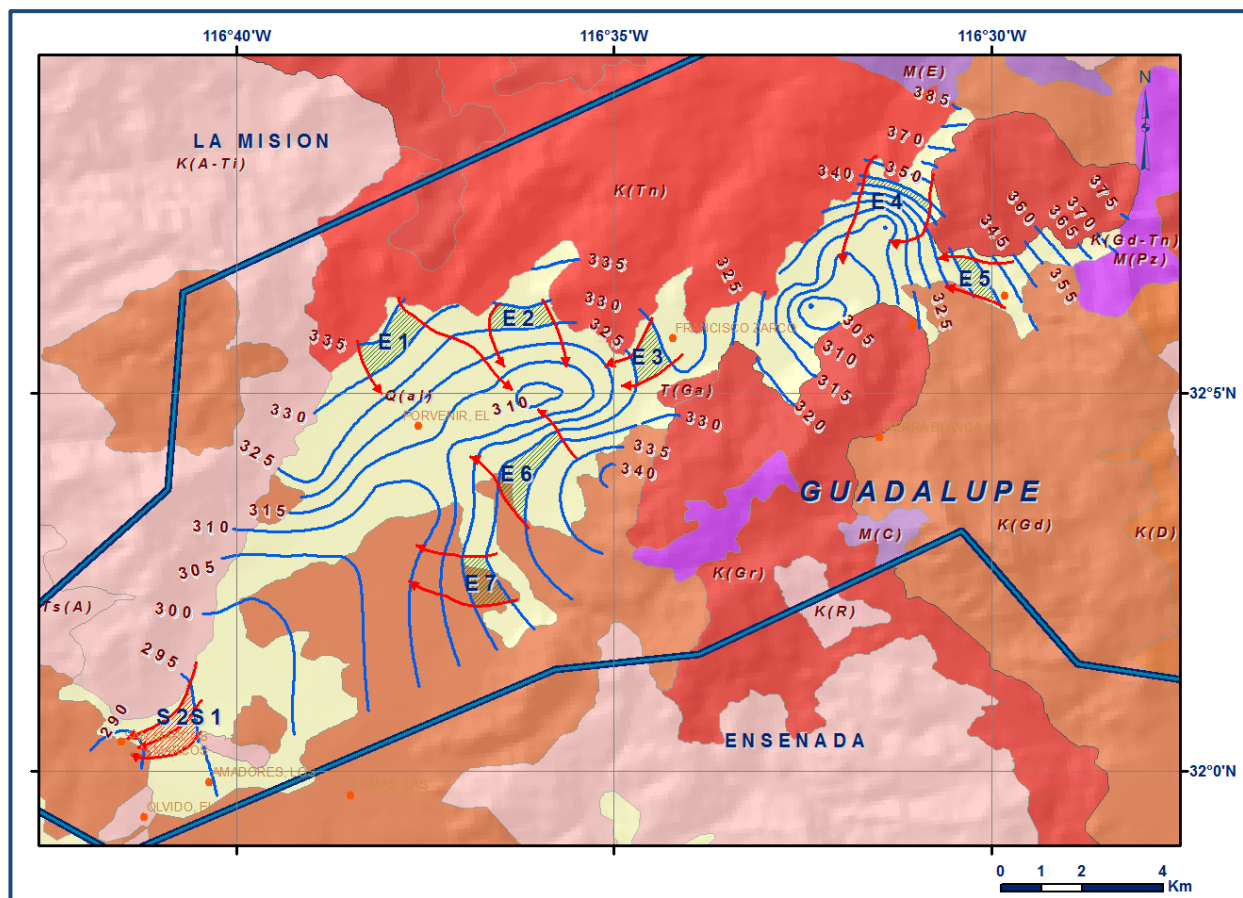


Figura 10. Elevación del nivel estático (msnm), 2008

Para 2009 se mantiene el mismo comportamiento que en 2008. En general en la fosa “Calafia”, las elevaciones del nivel estático varían de 296 a 392 msnm y en la fosa “El Porvenir” de 284 a 372 msnm (figura 11).

Las zonas de recarga más importantes se localizan en la entrada del arroyo El Burro y a la altura del poblado “El Porvenir”, esta última facilitada por la presencia de fallas y fracturas.

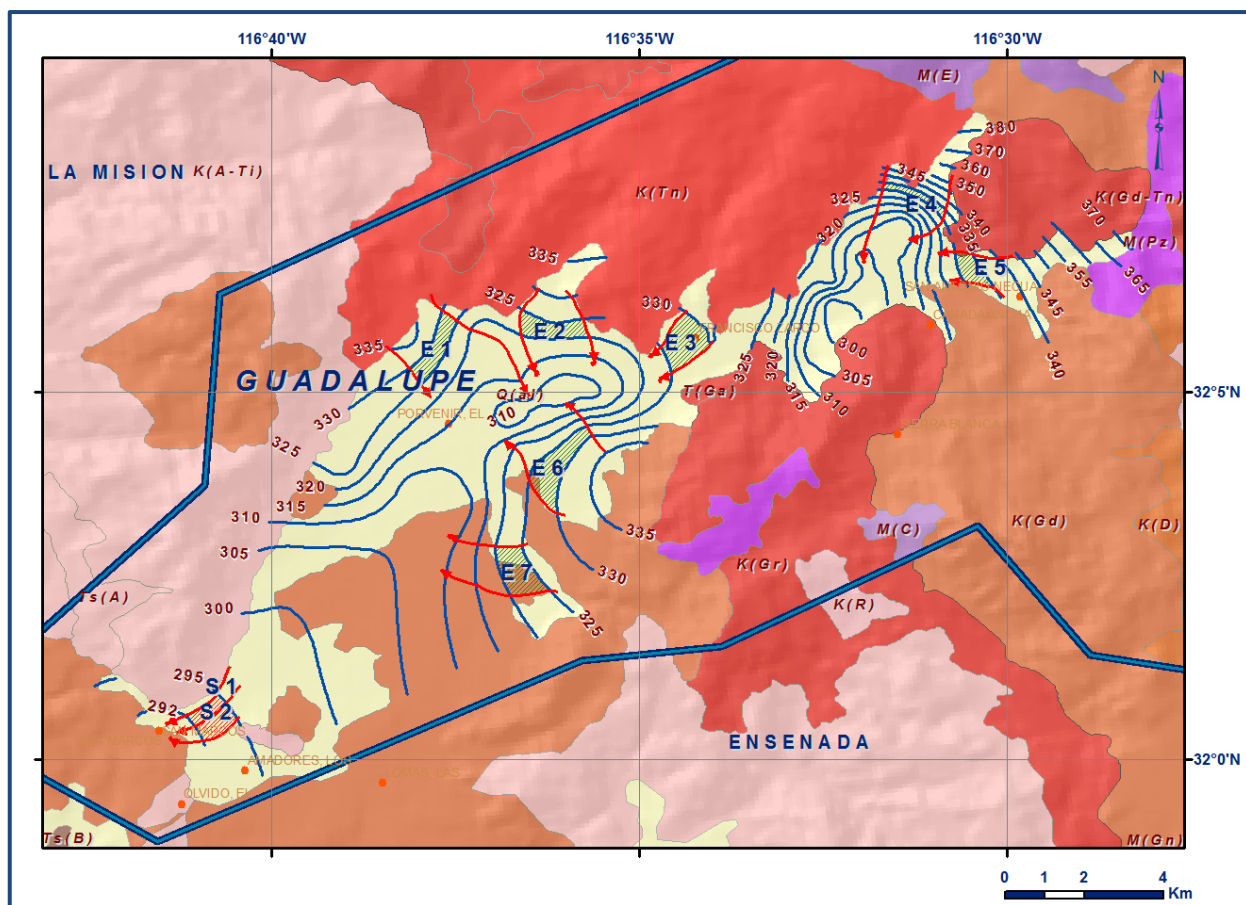


Figura 11. Elevación del nivel estático (msnm), 2009

5.3.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1990-1998, se observa que en la fosa “Calafia” se registró una recuperación de 3 m en promedio, que representan 0.4 m anuales. En tanto, para la fosa “El Porvenir” se registraron valores de recuperación en la mayor parte de su superficie y sólo al algunos aprovechamientos localizados al norte del poblado El Porvenir los abatimientos fueron de 1 a 2 m. La mayor parte del acuífero registró valores de recuperación de 2 a 3 m (figura 12).

Para el periodo 1998-2008 se observa claramente un descenso de los niveles estáticos en ambas fosas. En la fosa “Calafia” los abatimientos variaron de 4 a 24 m, que representan un ritmo anual de 0.4 a 2.4 m anuales. Los mayores abatimientos se registraron en la porción central de la fosa (figura 13).

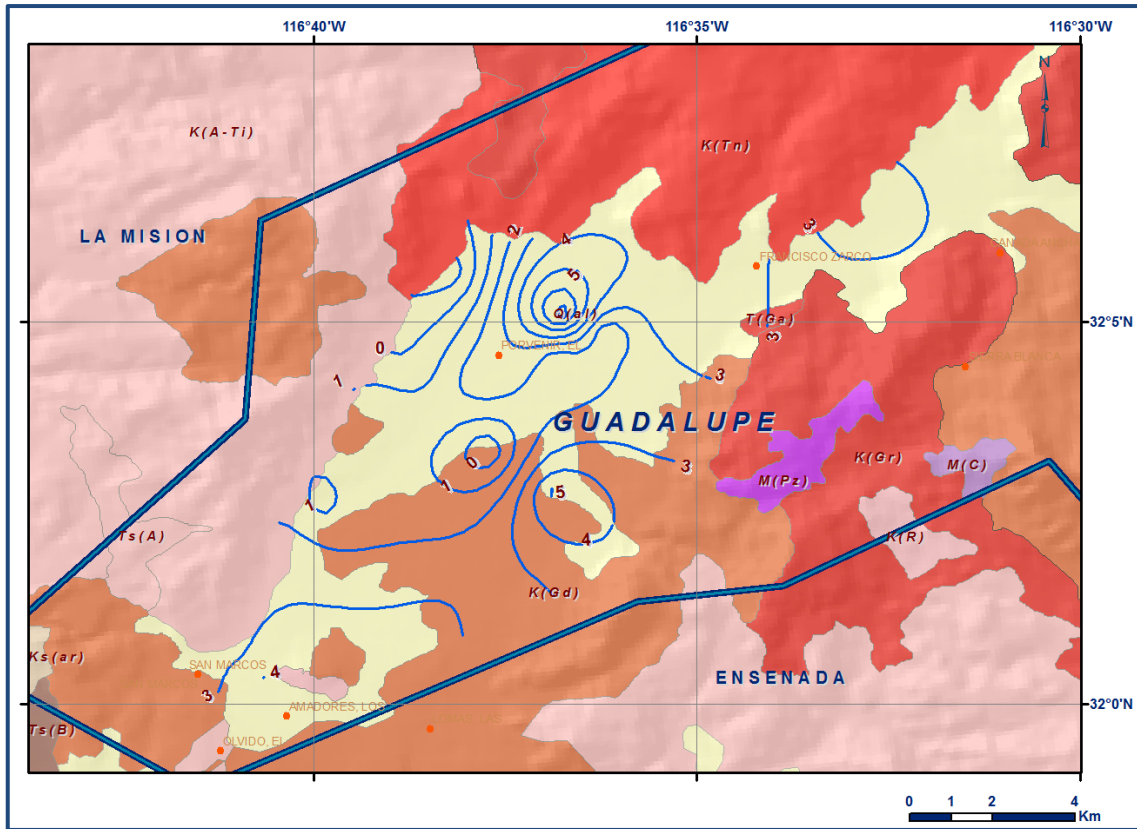


Figura 12. Evolución del nivel estático (m), 1990-1998

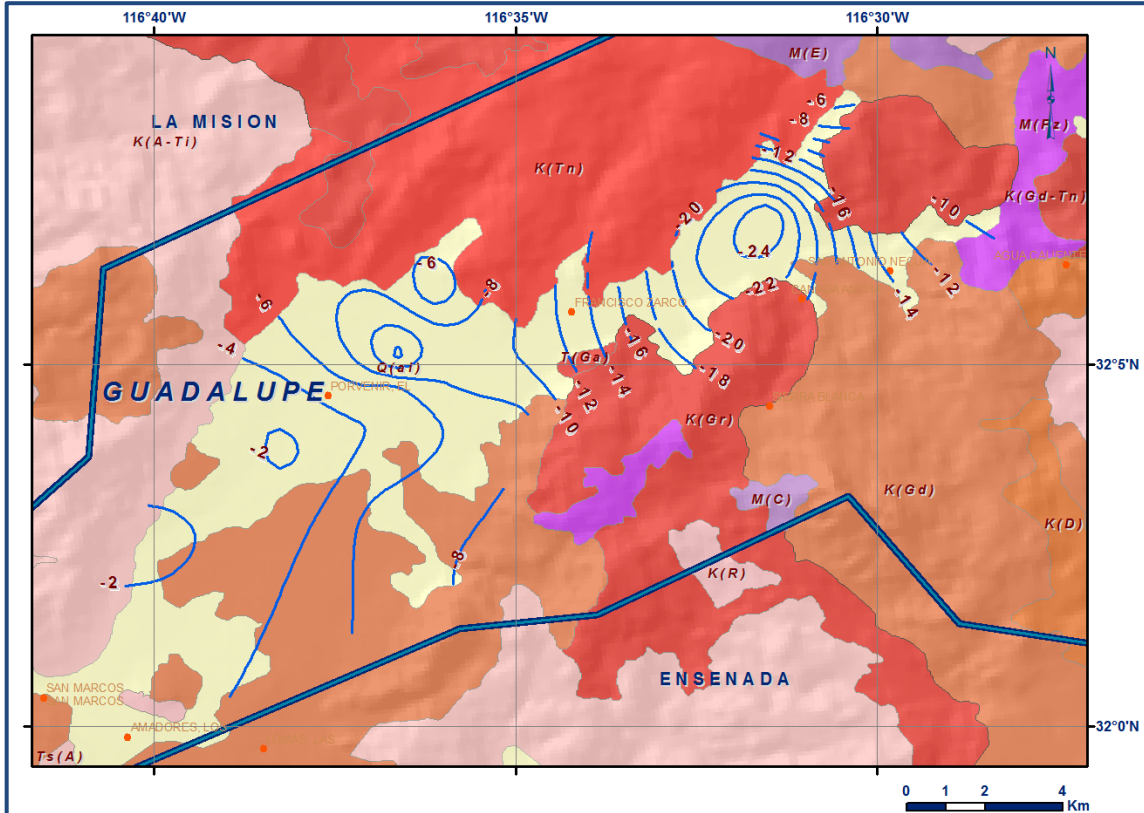


Figura 13. Evolución del nivel estático (m), 1998-2008

Para el periodo de 2008-2009 se registraron abatimientos de 1 a 2 m en la parte de la superficie de ambas fosas, valores extremos de hasta 3 m son muy locales (figura 14).

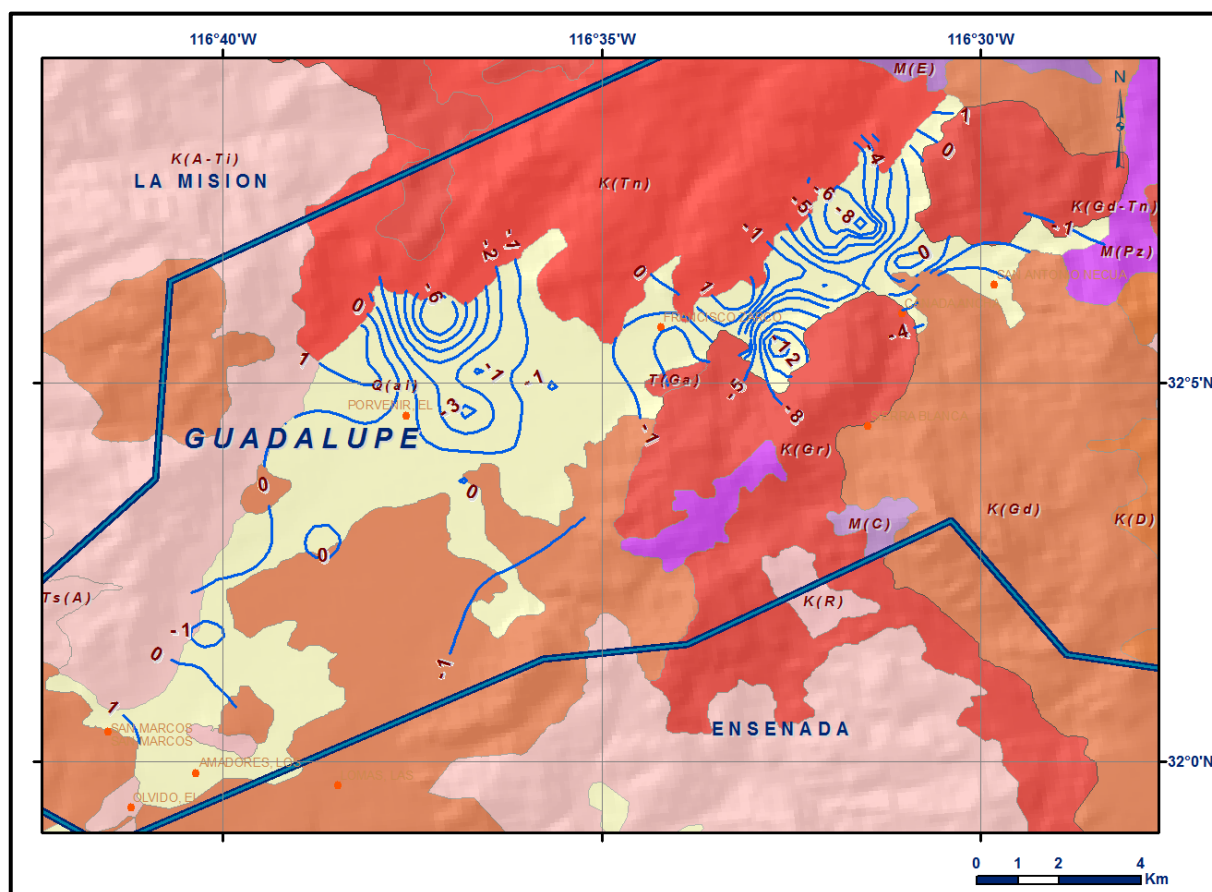


Figura 14. Evolución del nivel estático (m), 2008-2009

5.4. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La calidad del agua subterránea de la zona del acuífero se ha deteriorado debido al abatimiento de los niveles estáticos, a procesos geoquímicos naturales, a la percolación de agua de retorno de riego y a la infiltración de otros lixiviados provenientes de actividades domésticas e industriales.

En el 2001 la concentración de sólidos totales disueltos (STD) registró valores de 600 a 2700 mg/l, mostrando las mayores salinidades en la fosa “El Porvenir” (Daesslé *et al.*, 2006). Sin embargo, en años anteriores se reportaron concentraciones que variaban desde 300 a 3700 mg/l en 1981 y de 800 a 6,000 mg/l en 1990. Según este último reporte, la concentración promedio de STD se ha incrementado aproximadamente un 30% en 17 años. Además, Daesslé (2007) sostiene que las evidencias geoquímicas indican contaminación por fertilizantes en la fosa “El Porvenir”.

Las zonas con mayores concentraciones de sales, se registran en las inmediaciones del poblado Francisco Zarco y en la porción baja del valle. La misma distribución geográfica descrita presentan las concentraciones de cloro, sulfato y dureza total. Los altos contenidos de cloruros y sulfatos se deben en parte al retorno de los excedentes de riego agrícola, incrementándose hacia la parte más baja de la cuenca.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los censos realizados como parte de estudios previos, existe un total de 1007 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 310 son pozos y 697 norias. Del total de obras 756 están activas y 251 inactivas. El estudio realizado en 2008 sólo consideró la piezometría de la red piloto que está integrada por 94 aprovechamientos, 35 norias y 59 pozos.

El volumen total de extracción para el periodo más reciente 2008-2009 es de **34.7 hm³/año**, de los cuales 25.2 hm³/año (72.6%) son utilizados para la agricultura (principalmente para el cultivo de uva que se utiliza en la elaboración de vinos), 6.4 hm³/año (18.4%) para uso público-urbano, 2.1 hm³/año (6.0%) para uso doméstico, 0.4 hm³/año (1.2%) para uso doméstico y agrícola, 0.3 hm³/año (0.9%) para uso pecuario, 0.2 hm³/año (0.6%) para uso agrícola e industrial y 0.1 hm³/año (0.3 %) para uso industrial. Sin embargo para el periodo de balance 1990-2009 el valor promedio de la extracción es de **28.2 hm³ anuales**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para los periodos 1990-1998, 1998-2008 y 2008-2009, en una superficie de **93 km²**, 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 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 de un acuífero:

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo horizontal (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, debido a que solo existen algunas localidades son rurales dispersas, sólo se considera la recarga inducida por el riego agrícola (R_r).

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con 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:

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

Dónde:

R_v = Recarga vertical

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_i = Recarga inducida por retornos de riego

B = Bombeo

Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR = Evapotranspiración

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de

explotación. La recarga natural al acuífero tienen su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para los años 1990, 1998, 2008, y 2009 mostradas en las figuras 8, 9, 10 y 11, respectivamente, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

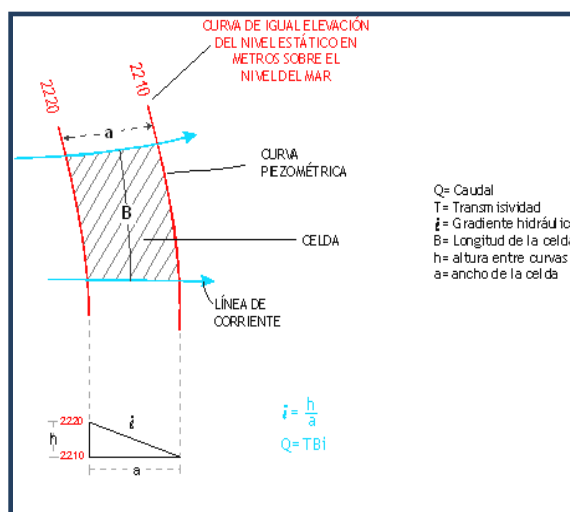
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/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 las tablas 2, 3, 4 y 5 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a 14.6, 12.2, 13.3 y 13.9 hm³ para los años 1990, 1998, 2008 y 2009, respectivamente. Por lo tanto el promedio anual es de **13.5 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (1990)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	GRADIENTE i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
E1	1660	530	5	0.0094	0.0032	0.0507	1.6
E2	1995	901	5	0.0055	0.0102	0.1129	3.6
E3	1095	916	5	0.0055	0.0102	0.0610	1.9
E4	1540	316	5	0.0158	0.0038	0.0921	2.9
E5	1110	557	5	0.0090	0.0049	0.0488	1.5
E6	2095	480	5	0.0104	0.0022	0.0471	1.5
E7	1015	222	5	0.0225	0.0022	0.0494	1.6
Total entradas							14.6

Tabla 3. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (1998)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	GRADIENTE i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOL. ANUAL (hm^3)
E1	1725	714	5	0.0070	0.0032	0.0391	1.2
E2	1900	833	5	0.0060	0.0102	0.1163	3.7
E3	991	1000	5	0.0050	0.0102	0.0505	1.6
E4	1523	454	5	0.0110	0.0038	0.0633	2.0
E5	934	714	5	0.0070	0.0049	0.0320	1.0
E6	2177	333	5	0.0150	0.0022	0.0705	2.2
E7	1000	714	5	0.0070	0.0022	0.0151	0.5
Total entradas							12.2

Tabla 4. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2008)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	GRADIENTE i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOL. ANUAL (hm^3)
E1	1635	715	5	0.0070	0.0032	0.0370	1.2
E2	1250	625	5	0.0080	0.0090	0.0900	2.8
E3	915	835	5	0.0060	0.0090	0.0493	1.6
E4	1587	200	5	0.0250	0.0038	0.1500	4.7
E5	1120	500	5	0.0100	0.0040	0.0448	1.4
E6	2045	715	5	0.0070	0.0022	0.0309	1.0
E7	1215	625	5	0.0080	0.0022	0.0210	0.7
Total entradas							13.3

Tabla 5. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2009)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	GRADIENTE i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOL. ANUAL (hm^3)
E1	1755	455	5	0.0110	0.0032	0.0625	2.0
E2	1450	625	5	0.0080	0.0090	0.1044	3.3
E3	910	1000	5	0.0050	0.0090	0.0410	1.3
E4	1535	215	5	0.0233	0.0038	0.1349	4.3
E5	880	500	5	0.0100	0.0049	0.0431	1.4
E6	1995	625	5	0.0080	0.0022	0.0345	1.1
E7	1290	715	5	0.0070	0.0022	0.0195	0.6
Total entradas							13.9

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.1.3. Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy 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.

En la superficie del acuífero existen aproximadamente 4,429 has de cultivos con riego, de las cuales en 2,658 ha (60 %) se cultiva uva y 1,771 ha (40%) son de otros cultivos de tipo mediterráneo como olivo, diversos frutales, algarrobo, alfalfa y hortalizas como jitomate, berenjena y chile morrón. Debido al uso de riego tecnificado, para la uva se aplica una lámina real de riego 0.741 m y para los demás cultivos una lámina promedio de 0.312 m. Tomando en consideración estos valores, se obtiene un volumen para uso agrícola de 25.2 hm³ anuales, este valor se considera válido para los años 2008 y 2009. Para 1990 y 1998 la superficie agrícola era menor y la lámina de riego era sensiblemente mayor.

Considerando un volumen para uso agrícola promedio de 25.2 hm³ anuales en el periodo 1990-2009 y que de este volumen un 10% en promedio retorna al acuífero, se obtiene una recarga inducida por riego agrícola de 2.5 hm³ anuales. Por lo tanto **Ri = 2.5 hm³/año.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas (Sh) y evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo Guadalupe.

7.2.1. 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 se considera 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). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Para la estimación de la evapotranspiración se descartaron los métodos empíricos de Turc y el de Smith, ya que para obtener resultados confiables los valores de la lámina media anual de lluvia deben ser mayores de 320 y 300 mm respectivamente. Para evaluar la magnitud de esta

componente se utilizó el método de White (1973), el cual considera un porcentaje del medido en el tanque evaporímetro, donde la evaporación es comparativamente más alta en los niveles freáticos menores a 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son mayores a 300 cm, según White citado por Keith (figura 15).

En la tabla 6, se muestran los porcentajes respecto al volumen evapotranspirado a las profundidades de 100, 200 y 300 cm, para los años 1990, 1998, 2008 y 2009. De ellas se puede observar que los valores son 0.16, 2.92, 0.43 y 0.57, respectivamente. Por lo tanto para el periodo 1990-2009 se obtiene un valor de 4.07 hm³ que representa un promedio anual de 1.0 hm³. **ETR = 1.0 hm³ anuales.**

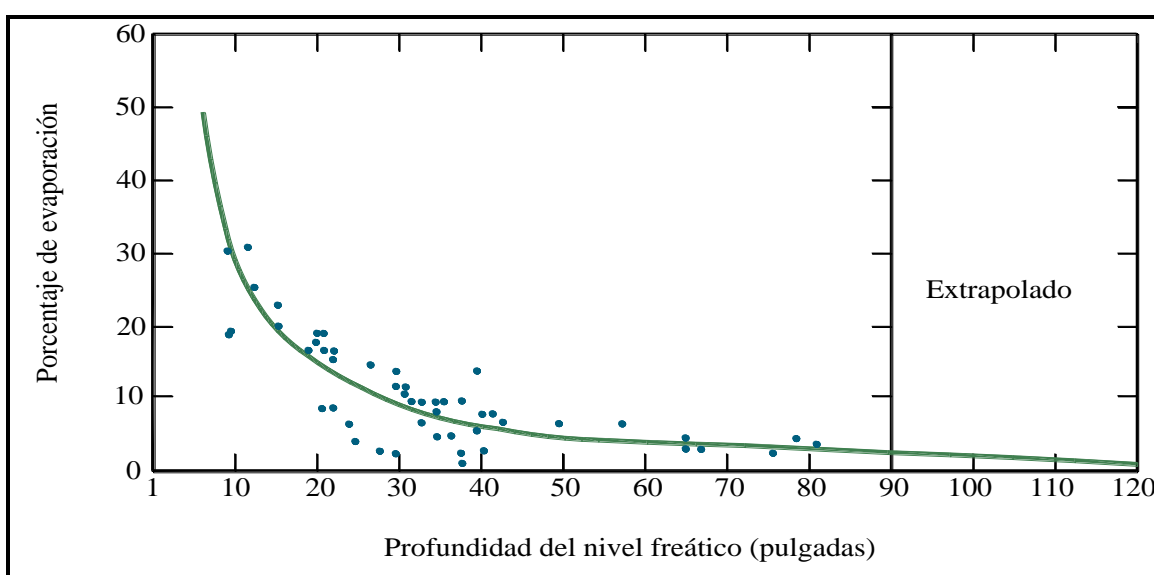


Figura 15. Evaporación del agua Subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático según White.

Tabla 6. Volumen evapotranspirado respecto al porcentaje estimado (gráfica de White).

PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	% DE EVAPORACIÓN (ESTIMADO GRÁFICA DE WHITE)	EVAPORACIÓN (mm/año)	ÁREA (Km ²)	VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm ³)	PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	% DE EVAPORACIÓN (ESTIMADO GRÁFICA DE WHITE)	EVAPORACIÓN (mm/año)	ÁREA (Km ²)	VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm ³)
JUNIO DE 1990					MARZO DE 2008				
100	6.0	1,618	3.0	0.291	100	6	1,618	0.50	0.049
200	5.0	1,618	5.0	0.404	200	4	1,618	0.50	0.032
300	3.0	1,618	7.0	0.339	300	3	1618	0.50	0.024
TOTAL				1.035	TOTAL				0.105
MAYO DE 1998					MARZO DE 2009				
100	6.0	1,618	7.76	0.753	100	2	1,618	0.30	0.010
200	5.0	1,618	7.76	0.628	200	1	1,618	0.30	0.005
300	3.0	1618	31.63	1.536	300		1618		
TOTAL				2.917	TOTAL				0.016

7.2.2. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor promedio de la extracción por bombeo calculado para el periodo 1990-2009 es de **28.2 hm³**.

7.2.3. 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 para 1990, 1998, 2008 y 2009, mostradas en las figuras 8 a 11. Los valores obtenidos para estos años, presentados en las tablas 7 a 10, son 0.8, 0.7, 0.2 y 0.1 hm³, respectivamente por lo que su valor promedio para el periodo 1990-2009 es de 0.4 hm³ anuales. **Sh = 0.4 hm³/año**

Tabla 9. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (1990)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	GRADIENTE i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (Mm ³)
S ₁	900	715	5	0.0070	0.0014	0.0091	0.3
S ₂	2280	980	5	0.0051	0.0014	0.0168	0.5
Total salidas							0.8

Tabla 10. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (1998)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	GRADIENTE i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
S ₁	495	355	5	0.0141	0.0014	0.0100	0.3
S ₂	900	500	5	0.0100	0.0014	0.0130	0.4
Total salidas							0.7

Tabla 11. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2008)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	GRADIENTE i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
S ₁	450	1450	5	0.0034	0.0014	0.0022	0.1
S ₂	570	1500	5	0.0033	0.0014	0.0027	0.1
Total salidas							0.2

Tabla 12. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2009)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	GRADIENTE i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
S ₁	330	1000	3	0.003	0.0014	0.0014	0.0
S ₂	435	1000	3	0.003	0.0014	0.0019	0.1
Total salidas							0.1

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomaron en cuenta las configuraciones de evolución del nivel estático para los periodos 1990-1998, 1998-2008 y 2008-2009, (figuras 13, 14 y 15, respectivamente). Con base en ellas se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 93 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

A partir de estas configuraciones, tomando en cuenta un rendimiento específico promedio de 0.065, se obtuvieron cambios de almacenamiento de 2.4, -5.6 y -6.4 hm³ para los periodos mencionados. Por lo tanto, el valor para el periodo 1990-2009 es de -9.6 hm³, que equivalen a -3.2 hm³ anuales

$$\Delta V(S) = - 3.2 \text{ hm}^3.$$

Solución a la ecuación de balance

Una vez estimadas las componentes que intervienen en el balance de aguas subterráneas, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones (R_v), mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad

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

$$R_v = 28.2 + 0.4 + 1.0 - 3.2 - 13.5 - 2.5$$

$$R_v = 10.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R_t = R_v + Eh + R_r$$

$$R_t = 10.4 + 13.5 + 2.5$$

$$R_t = 26.4 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Dónde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual (Rt) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como de recarga inducida. Para el caso del acuífero Guadalupe su valor es de **26.4 hm³/año**, de los cuales 23.9 hm³ son recarga natural y 2.5 hm³ son recarga inducida.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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, se considera una descarga natural comprometida de **1.4 hm³/año**, de los cuales 0.4 hm³ corresponden a la salida subterránea y 1.0 hm³ a la evapotranspiración.

DNCOM = 1.4 hm³/año.

8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)

De acuerdo a la información existente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), el volumen concesionado de aguas subterráneas para este acuífero, al **31 de marzo de 2013** es de **37,045,470 hm³/año**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)

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, de acuerdo con la expresión (3), se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\begin{aligned} \mathbf{DAS} &= \mathbf{Rt - DNCOM - VCAS} \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{26.4 - 1.4 - 37.045470} \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{-12.045470 \text{ hm}^3 \text{ anuales}} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nueva concesiones, por el contrario el déficit es de **12'045,470 m³ anuales**, que se extraen del almacenamiento no renovable del acuífero.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1999. Estudio de Simulación Hidrodinámica del Acuífero Guadalupe, B.C. Realizado por Desarrollo y Sistemas, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Estudio Técnico de Actualización de la Disponibilidad del Acuífero 0207 Guadalupe, Municipio de Ensenada, estado de Baja California. Realizado por Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S, A. de C.V

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1979. Estudio Geohidrológico de los Valles El Médano y El Descanso, en el Estado de Baja California. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2003. Carta Geológica-Minera I11-11 "Tijuana", escala 1:250,000.