

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MULEGÉ (0332), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA SUR**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

CONTENIDO

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación Administrativa del Acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía.....	7
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA.....	8
4.1	Estratigrafía.....	9
4.2	Geología Estructural.....	11
4.3	Geología del Subsuelo.....	11
5	HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1	Tipo de acuífero.....	12
5.2	Parámetros hidráulicos.....	12
5.3	Piezometría.....	14
5.4	Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	14
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	15
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	15
5.5	Hidroggeoquímica y calidad del agua subterránea.....	16
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	17
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1	Entradas.....	18
7.1.1	Recarga Vertical (Rv).....	18
7.1.2	Entradas subterráneas horizontales (Eh).....	19
7.1.3	Retornos de riego (Rr).....	20
7.2	Salidas.....	20
7.2.1	Evapotranspiración (ETR).....	20
7.2.2	Bombeo (B).....	22
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	22
7.2.4	Descarga por manantiales (Dm).....	23
7.3	Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$	23
8	DISPONIBILIDAD.....	24
8.1	Recarga total media anual (R).....	25
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	25
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	25
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	26
9	BIBLIOGRAFÍA.....	27

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 Mulegé, definido con la clave 0332 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del estado de Baja California Sur, entre los paralelos 26° 36' y 26° 56' de latitud norte y los meridianos 111° 53' y 112° 15' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 742 km². El acuífero se localiza entre la sierra La Giganta y el Golfo de California. Colinda al norte con el acuífero San Marcos Palo Verde, al Sur con los acuíferos Bahía Concepción y La Purísima, al Oeste con el acuífero San Ignacio y al Este con el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente el acuífero se localiza totalmente dentro del municipio de Mulegé, destacando en él la población de Heroica Mulegé.

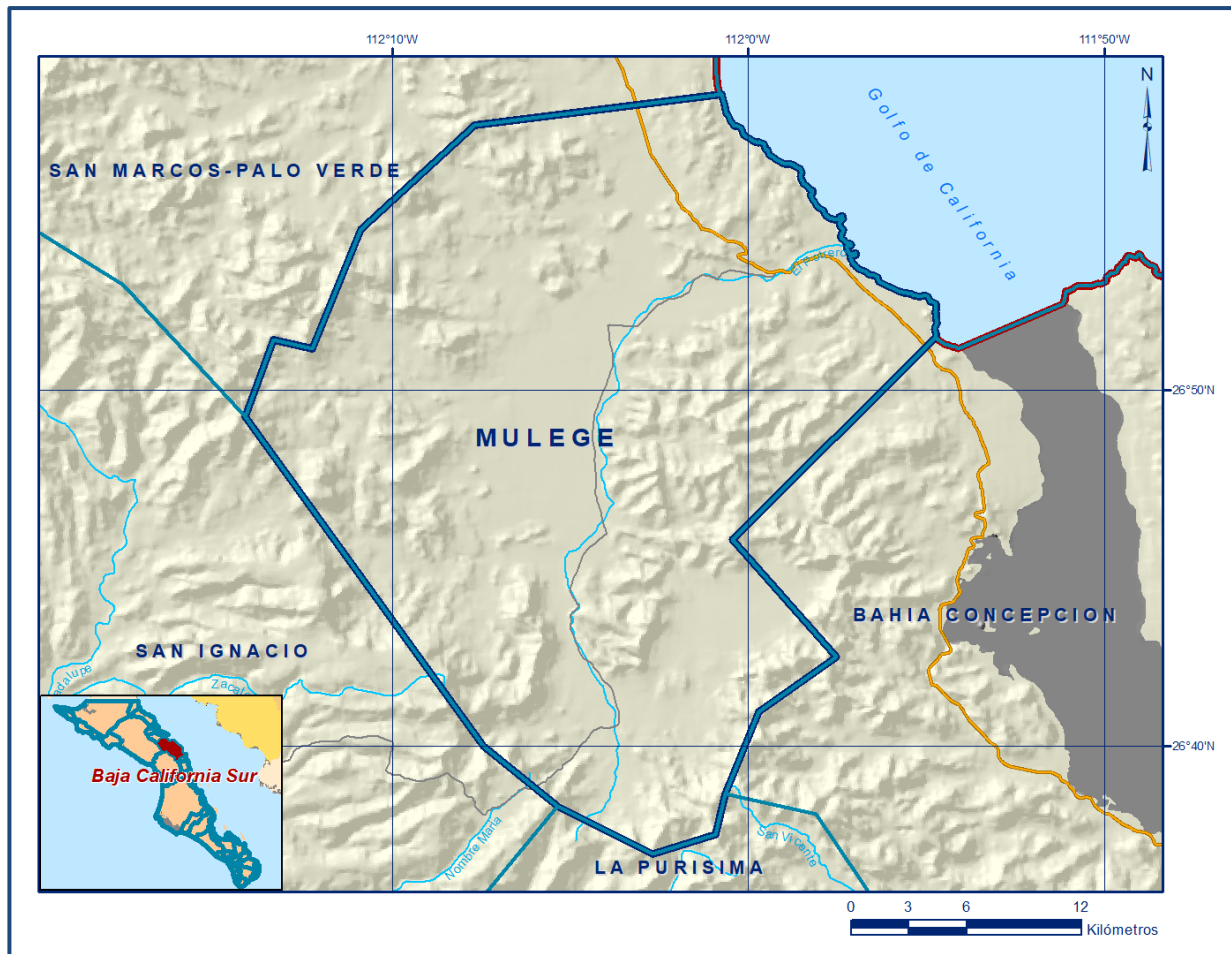


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUÍFERO 0332 MULEGE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	111	54	43.4	26	51	28.6	
2	112	0	27.5	26	45	48.8	
3	111	57	31.3	26	42	29.7	
4	111	59	42.1	26	40	57.6	
5	112	0	38.6	26	38	39.5	
6	112	0	55.5	26	37	31.5	
7	112	2	41.7	26	36	58.6	
8	112	5	21.6	26	38	18.6	
9	112	7	26.3	26	40	0.4	
10	112	14	8.7	26	49	15.9	
11	112	13	21.6	26	51	24.8	
12	112	12	15.8	26	51	10.4	
13	112	10	53.4	26	54	31.0	
14	112	7	42.0	26	57	26.3	
15	112	0	45.4	26	58	18.5	DEL 15 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	111	54	43.4	26	51	28.6	

1.2 Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Baja California Sur; así mismo forma parte del Consejo de Cuenca (I) Baja California Sur, instalado el 3 de marzo de 2000 y dentro de este se integra el Comité Técnico de Aguas Subterráneas Mulegé instalado el 29 de noviembre del 2001.

El territorio del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones del “Acuerdo que establece el Distrito Nacional de Riego de Baja California Sur, declarando de utilidad pública la construcción de las obras que lo forman”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de julio de 1954. Esta veda se clasifica como tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El volumen de agua subterránea concesionado durante la instalación del Comité Técnico de Aguas Subterráneas, es:

Agrícola	Pecuario	Doméstico	Pub. Urb.	Industrial	Total
4.005	0.032	0.003	0.497	0.004	4.541

Debido a lo anterior el principal usuario del agua subterránea es el Ejido Mulegé 20 de noviembre quién extrae los mayores volúmenes dentro del área de mayor concentración de aprovechamientos y en una menor proporción el Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado del municipio y consecutivamente la industria de hielo.

El usuario menor lo constituye la actividad pecuaria y de uso doméstico ubicados fuera de la zona de mayor extracción. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE SAN BRUNO-MULEGÉ-SANTA ROSALÍA EN EL TERRITORIO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos, en 1974. Sus objetivos fueron realizar un reconocimiento hidrogeológico sobre las características de Mulegé y sus acuíferos aledaños, precisando sobre el censo de pozos, la geología e hidráulica.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO MULEGÉ, elaborado por la empresa CLARIÓN, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1980. Sus objetivos fueron, definir la recarga o entrada de agua al acuífero y el de localizar dichas zonas de recarga mediante el establecimiento de la red del flujo subterráneo para hacer un balance de su disponibilidad, estableciéndose un régimen de explotación para evitar efectos perjudiciales irreversibles. Concluye que las entradas por flujo subterráneo son del orden de los 3.5 hm³ anuales y la infiltración total por lluvia en todo el valle de 1.9 hm³ anuales. Por lo tanto, el valor de la recarga media anual que recibe el acuífero asciende a 5.4 hm³ anuales.

SINOPSIS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR, elaborado en la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua, en 1991. En donde se menciona el régimen permanente del manantial, cuya descarga natural es propiciada por las condiciones geológicas y topográficas prevalecientes.

Un volumen de agua almacenada en su presa se descarga al mar a través del estero existente.

En septiembre del **2004, la Residencia Técnica de la Gerencia Estatal realiza mediante su brigada de topografía LA NIVELACIÓN DE BROCALES** de cada uno de los aprovechamientos que se localizan dentro de la zona de mayor extracción en los cuales se ha venido observando el nivel estático durante los últimos años a través de los paros anuales de los equipos de bombeo, efectuados a finales del ciclo agrícola primavera verano.

Con el seguimiento de la información contenida en dichos estudios, la observación anual del nivel estático y el monitoreo de la calidad del agua, se ha actualizado el conocimiento hidrogeológico del acuífero, lo que permite realizar el presente balance hídrico.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Mulegé pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Volcánica de Baja California (Manuel Álvarez Jr.) o región de La Giganta (Federico Mina, 1957) que está formado por un valle aluvial bordeado por rocas ígneas de la Sierra La Giganta que es labrado por el “Arroyo Mulegé”, el cual desde su nacimiento hasta su desembocadura en el Golfo de California tiene un desarrollo de 40 km, a través de los cuales numerosos arroyos confluyen a él por ambas márgenes, siendo mayores los tributarios de la margen izquierda.

La capacidad de corte de la corriente principal en edades anteriores y los arroyos que descienden de la margen izquierda, formaron en esta margen una amplia terraza fluvial de suave pendiente. Tres kilómetros antes de su desembocadura el “Arroyo Mulegé” es encañonado por rocas volcánicas, descargando sus excedentes hacia el mar que durante la pleamar llega a remontar hasta la altura del Puente Carretera.

3.2 Clima

Según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región se puede considerar en la categoría BW (H´) HS (e). BW – Muy seco; H´ – Muy cálido con temperatura media anual de 22° C y la del mes más frío 18° C.

En cuanto al régimen de lluvias en otoño-invierno se presenta por lo menos tres veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad fría del año que en el mes más seco, representando el 40% de la precipitación anual.

Se cuenta con registro para un periodo de 19 a 37 años en siete estaciones localizadas tanto dentro del acuífero como en sus inmediaciones, que arrojan un promedio anual de 116 mm con una temperatura promedio anual de 22.8° C.

Los meses con precipitaciones mayores de 5 mm son julio, agosto, septiembre, octubre, diciembre, enero y febrero, los cuales aportan infiltración al acuífero y efecto de almacenamiento en la Presa derivador la “Misión” ya que con la precipitación promedio y la superficie total del acuífero, se estima un volumen de 77.6 hm³/año. Conforme a las mediciones realizadas en las mismas estaciones pluviométricas se determinó que la evaporación potencial media varía de 1,789 a 2,557 mm anuales.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 5 Baja California Centro Este, que está limitada por los arroyos Santa Isabel en Baja California y por los arroyos Paterna hasta el arroyo Mulegé en Baja California Sur, dentro de la vertiente del Golfo de California en una angosta franja costera.

El colector superficial principal lo constituye el propio arroyo Mulegé cuyo cauce presenta características de permeabilidad favorables que permiten la infiltración de los escurrimientos superficiales, existiendo condiciones geológicas y topográficas en su parte alta para la formación de vasos de almacenamiento mediante la construcción de bordos; y en su parte media la construcción de pequeñas represas.

Aguas abajo de la zona de Riego existente, se ubica la presa derivadora la “Misión” próximo al poblado de la Heroica Mulegé que se abastece de dos pozos que opera el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado.

Anteriormente el riego se realizaba a través de los canales de derivación de dicha presa hacia aguas abajo por ambos márgenes del arroyo Mulegé, pero actualmente las condiciones de derivación están modificadas ante la presencia de la actual y única zona de riego existente por bombeo aguas arriba.

3.4 Geomorfología

Se identifican dos rasgos geomorfológicos bien definidos: El primero se localiza al norte, sur y oeste que circundan al Valle de Mulegé, con elevaciones mínimas de 4 msnm y mayores de 1,200 msnm, constituida predominantemente por rocas ígneas extrusivas de composición riolítica (tobas riolíticas) y escasas brechas y andesitas basálticas de edad paleógeno- Neógeno, así como clásticos y piroclásticos correspondientes a depósitos sedimentarios continentales de origen fluvial del Cuaternario.

Las tobas riolíticas son rocas de suma importancia, ya que aportan en forma sustancial aguas termales al acuífero, esto se refleja con temperaturas elevadas que fluctúan entre 26 a 33° C en pozos someros.

El segundo rasgo fisiográfico se ubica en el área, ocupando por la superficie acuífera y antiguos esteros con influencia marina.

El área está delimitada entre las elevaciones 0 y 200 msnm, constituida por depósitos sedimentarios no consolidados de origen fluvial y depósitos aluviales correspondientes al Cuaternario, constituidos por arenas de diferente granulometría, gravas, gravillas, boleos localizados en las áreas de alta energía y arcillas como cementante; así mismo, en el subsuelo del Valle de Mulegé se presenta un complejo intrusivo de composición ácida e intermedia, cuya profundidad aún no ha sido determinada. Las riolitas son de suma importancia ya que son la fuente de calor para el agua subterránea en algunas porciones del acuífero.

4 GEOLOGÍA

La geología general está representada por rocas de edad Paleógeno-Neógeno compuestas por clásticos, piroclásticos y rocas volcánicas que ocupan las dos terceras partes de la ladera oriental de la Sierra de la Giganta y que se depositaron sobre las rocas graníticas del batolito peninsular de composición ácida e intermedia (figura 2).

Así mismo sobre las laderas de dicha sierra se presentan depósitos de talud de granulometría media a gruesa, sin cubierta vegetal que funcionan como transmisores de agua hacia los materiales aluviales más recientes localizados sobre los abanicos aluviales, cauce fluvial y valle aluvial donde existe una cobertura vegetal.

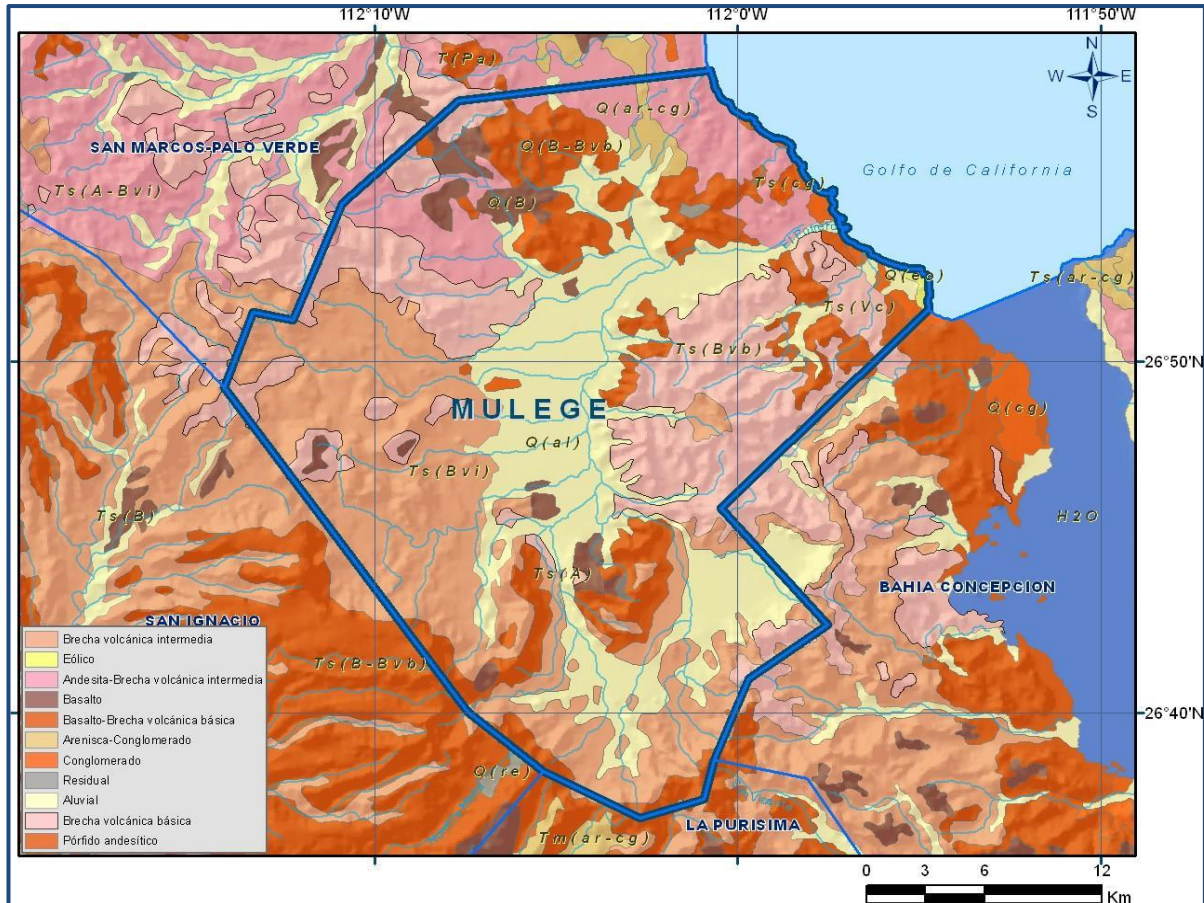


Figura 2. Geología general de acuífero

4.1 Estratigrafía

Las unidades estratigráficas que afloran en el área, se depositaron durante el proceso que inició por el eje de fallamiento producido durante el Mioceno, asociado a la apertura del Golfo de California. Existen también los materiales clásticos del proceso pleistocénico y las rocas volcánicas originadas posteriormente a los movimientos epirogénicos de la emersión de la plataforma submarina, finalizando dicho proceso con la conformación de la sierra La Giganta, tal como sigue:

La Formación Comondú (Heim, Arnold, 1922)

Está constituida por una alternancia de materiales volcánicos y sedimentarios. Incluye areniscas, conglomerados, brechas volcánicas, andesitas y tobas. Las areniscas se presentan bien consolidadas y compactas. Los conglomerados están constituidos por fragmentos redondeados, de origen ígneo, empacados en arenas. Las areniscas y los conglomerados se encuentran complejamente interestratificados e intrusionados por diques de composición intermedia y básica.

Las tobas y brechas presentan una composición predominantemente básica. Las brechas están constituidas por fragmentos de 0.3 a 40 cm de diámetro, empacadas en una matriz tobácea intrusionadas por diques. Constituye la mayor parte de las elevaciones topográficas que corresponden a la Sierra La Giganta.

Presenta una estratificación casi horizontal, con una sensible inclinación hacia el poniente. Su espesor se estima en más de 1,000 m y su edad corresponde al Mioceno. Fue dividida por Federico Mina en 1957 en dos Unidades:

- La primera formada por rocas piroclásticas y volcánicas, presenta composición andesítica, basáltica y riolítica. Así como conglomerados lenticulares y brechas de talud.
- La segunda unidad, formada principalmente por conglomerados, areniscas y algunas argilitas; esta unidad fue propuesta como formación por Chávez (1978), con el nombre de "Formación Huertitas", en el área que comprende este acuífero se encuentra intrusionada por diques de composición básica.

A través del fracturamiento permite recargar lentamente el agua retenida durante las lluvias hacia la zona baja, donde se localizan los rellenos aluviales del Cuaternario.

Formación Salada (Heim, 1922)

Está constituida por areniscas y conglomerados de color café a gris, con espesor promedio de 50 m. aproximadamente, con presencia de fósiles de la localidad tipo de edad pliocénica.

Su contacto inferior con la Formación Comondú es en discordancia angular, aflora como depósito de talud y presenta discordancia lateral con las terrazas fluviales favoreciendo la infiltración hacia almacenamiento subterráneo.

Cuaternario Aluvial.

Constituido por cantos rodados de origen volcánico. - Tobas y Lavas, provenientes de la erosión de rocas de origen ígneo de la misma Formación Comondú, su edad se ha asignado al Pleistoceno con base en su posición estratigráfica y la fauna marina (pleistocénica en los litorales del Golfo de California), constituye las vegas de los arroyos con una alta permeabilidad. Constituye la unidad principal por donde circula casi toda la recarga del acuífero.

Reciente de Tipo Fluvial

Son suelos residuales, aluviones, gravas, arenas, limos, tobas y conglomerados volcánicos que sufrieron posteriormente descomposición química.

Constituye los cauces y arroyos en los que se presenta una alta infiltración por sus características altamente permeables.

4.2 Geología Estructural

La geología estructural de la zona está representada por una serie de fallas y fracturas. La falla más importante tiene una orientación NW-SE y se presenta en las rocas de la Formación Comondú formando un escarpe muy característico de la expresión morfológica de esta porción de la vertiente del Golfo de California. Las fallas se presentan tanto en las rocas de formación Comondú como en las de la Formación Salada y generalmente son perpendiculares a la falla.

4.3 Geología del Subsuelo

El conocimiento del basamento en el subsuelo no ha sido explorado mediante estudios de prospección geofísica o con pozos exploratorios que permitan determinar la forma y profundidad del acuífero. De acuerdo con la información de los pozos perforados en la región, se puede inferir que el acuífero principal está alojado en los depósitos granulares de origen aluvial, que constituyen el relleno del valle, cuyo espesor total se desconoce.

De acuerdo a la profundidad de los pozos y a los escasos sondeos geofísicos realizados en el área, se estima que el espesor varía entre 50 y 200 m. Las fronteras y barreras al flujo están representadas por los horizontes menos permeables de la Formación Comondú constituidas por las andesitas y brechas volcánicas de composición intermedia que no presentan fracturamiento, así como las rocas sedimentarias de granulometría fina que constituyen a la misma formación. Al igual que otras regiones de la zona, la Formación Comondú cuando presenta permeabilidad secundaria constituye una unidad acuífera de buena capacidad transmisora y de almacenamiento.

En la figura 3 se muestra la sección geológica esquemática longitudinal A-A' marcada en el plano geológico, y en ella se muestra el funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

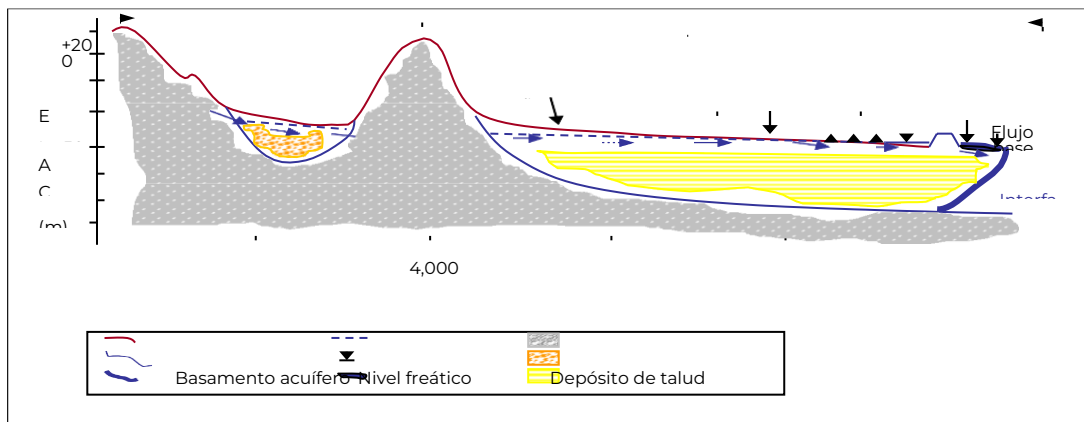


Figura 3. Sección Geológica Esquemática

5 HIDROGEOLOGÍA

En la zona se distinguen básicamente dos tipos de unidades: Permeables e Impermeables. Las permeables, actúan como zonas de recarga y también como acuíferos, mientras que las impermeables funcionan como fronteras y barreras al flujo subterráneo.

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero que se explota actualmente está alojado en los depósitos granulares de origen aluvial que constituyen el relleno del valle. Es de **tipo libre** y presenta una granulometría muy variada, típica de los rellenos de este tipo, cuyo origen se debe a la acción de fenómenos exógenos y endógenos que facilitan el debilitamiento, fracturamiento, fragmentación, erosión y transporte de las rocas preexistentes. La permeabilidad de estos depósitos es buena.

Aunque algunas de las unidades que conforman a las formaciones Comondú y Salada tradicionalmente han sido definidas como impermeables, es muy frecuente que presenten permeabilidad secundaria por fracturamiento, lo que les confiere características de unidades transmisoras de agua hacia los depósitos aluviales. En estas condiciones, sus afloramientos generalmente funcionan como zonas de recarga.

5.2 Parámetros hidráulicos

En los estudios previos de 1974 y 1980 se realizaron 15 pruebas de bombeo, tanto en pozos como en norias, localizados dentro de la zona agrícola, zona de mayor explotación.

La duración de las pruebas depende del tipo de aprovechamiento y varió de 1 a 8 hrs, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación se deduce que los valores de transmisividad varían de 2.65 a $79.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, cuyos valores menores corresponden a la zona oriental donde los espesores del acuífero son más reducidos (tabla 2). Las transmisividades mayores corresponden a la zona occidental donde el material es más permeable y además el espesor del acuífero es mayor, en la tabla se presenta la relación de los pozos donde se efectuaron estas pruebas. En el estudio previo de 1974 se dio solución a un sistema de ecuaciones con dos incógnitas, a partir del cual mediante un ajuste de mínimos cuadrados se obtuvo un coeficiente medio regional de almacenamiento del 40%; así mismo en el estudio de 1980 se establecieron ecuaciones que permitieron determinar un coeficiente de almacenamiento de 0.172 a 0.256, por lo que se ha adoptado su promedio (0.204) como valor representativo del acuífero.

Tabla 2. Valores de transmisividad obtenidas mediante prueba de bombeo

NOMENCLATURA		TRANSMISIVIDAD		
POZO No.	EMPRESA CLARION (1980)	m^2/s		
		ABATIMIENTO	RECUPERACIÓN	PROMEDIO
ZA-55	55**	9.316×10^{-3} y 4.456×10^{-2}	2.562×10^{-2}	17.47×10^{-3}
ZA-57	57**		6.374×10^{-3} y 2.836×10^{-2}	6.37×10^{-3}
ZA-66	66**	1.535×10^{-2}	1.699×10^{-2}	16.17×10^{-3}
ZA-82	82**	4.706×10^{-2}	1.235×10^{-2} y 8.235×10^{-2}	29.71×10^{-3}
ZA-83	83**	4.633×10^{-3}	3.553×10^{-3} y 2.033×10^{-2}	4.09×10^{-3}
ZA-84	84**	2.90×10^{-3}	5.912×10^{-3} y 1.787×10^{-2}	4.41×10^{-3}
ZA-85	85**	7.127×10^{-2}		71.27×10^{-3}
OH-4	240**	1.264×10^{-2}	3.16×10^{-2}	22.13×10^{-3}
TM-40	64**	16.903×10^{-3}	4.225×10^{-2}	4.225×10^{-2}
ZA-64	230**	5.307×10^{-3}	3.316×10^{-2}	19.23×10^{-3}
NOMENCLATURA		TRANSMISIVIDAD		
POZO No.	EMPRESA TMI (1974)	m^2/s		
		ABATIMIENTO	RECUPERACIÓN	PROMEDIO
ZA-56	4**		7.73×10^{-2}	77.3×10^{-3}
ZA-66	6**	1.636×10^{-2}	1.455×10^{-2}	15.455×10^{-3}
ZA-8	8**	1.48×10^{-2} y 1.204×10^{-2}		13.42×10^{-3}
ZA-10	10**	7.97×10^{-2}		79.7×10^{-3}
ZA-83	27**	3.11×10^{-3} y 3.28×10^{-3}		3.195×10^{-3}
13	43**	2.654×10^{-3}		2.654×10^{-3}

5.3 Piezometría

Para los fines del Balance se considera la información piezométrica obtenida en el año 2005, ya que durante la temporada del 2006 por la presencia del Huracán Jhon no se observaron algunos aprovechamientos. Dichos niveles estáticos observados corresponden a los paros de equipos de bombeo que organiza la Dirección Local Baja California Sur anualmente al final del ciclo agrícola primavera-verano, por lo que el periodo correspondiente analizado comprende de 1992 a 2005.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2005 registra valores de 5 a 55 m. Los valores más someros se localizan hacia la zona que limita con la salida del flujo subterráneo que alimenta el vaso de la Presa y los más altos hacia las proximidades de la Sierra La Giganta. Profundidades intermedias se registran en la zona conocida como Año Nuevo y en la zona central donde se concentra la mayor extracción para uso agrícola (figura 4).

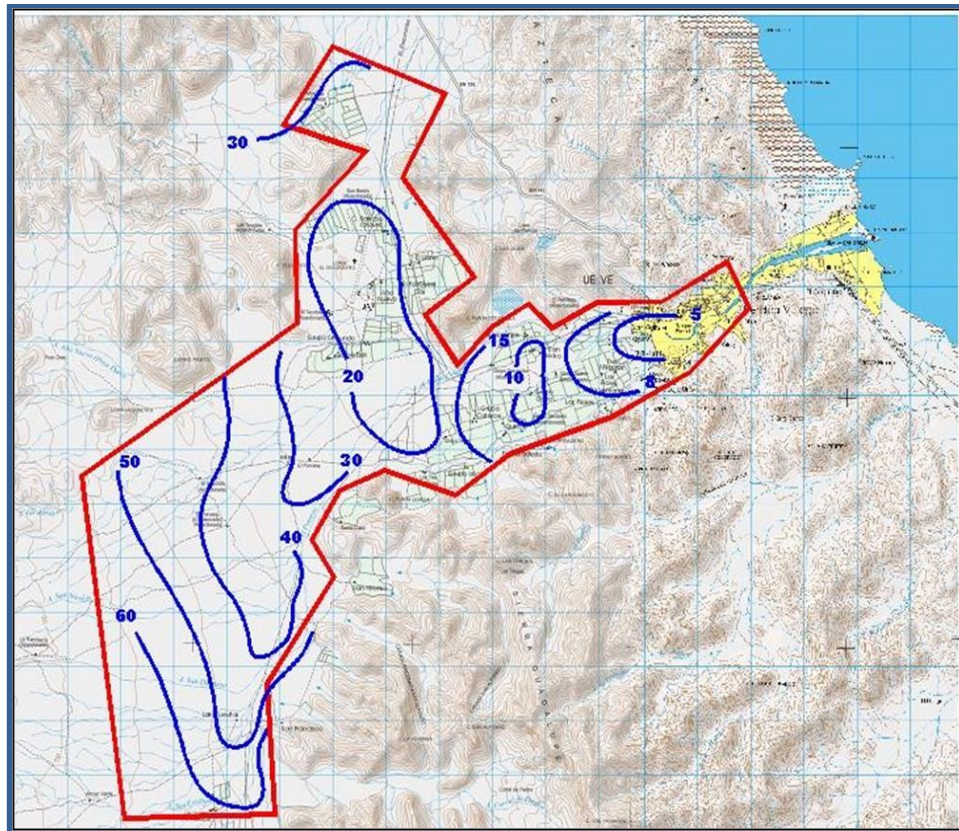


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2005)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para septiembre de 2005 manifiesta elevaciones máximas de 5 msnm en la zona próxima a la Sierra La Giganta, valores intermedios de 4.0 a 3.5 msnm en la zona conocida como Año Nuevo y porción central y de 3.3 a 2.5 en la zona de mayor extracción para uso agrícola hacia la desembocadura de la presa, como se muestra en la figura 5.

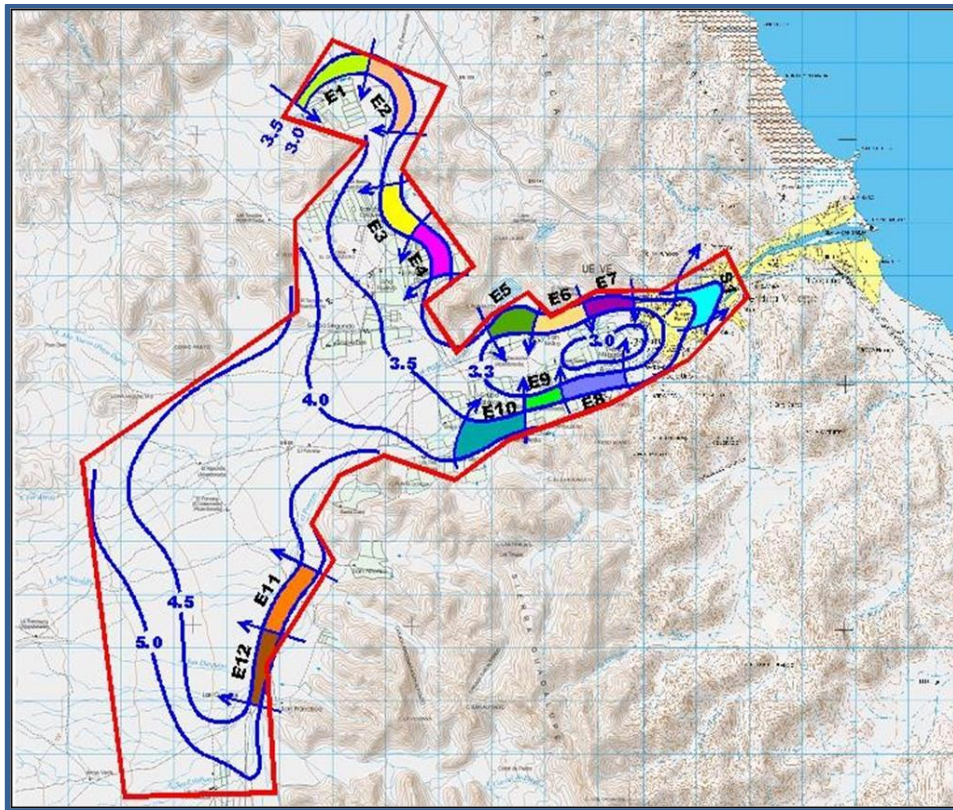


Figura 5. Elevación de nivel estático en msnm (2005)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de la evolución del nivel estático para el periodo 1992-2005 muestra abatimientos del orden de 0.5 m en los aprovechamientos localizados hacia las estribaciones de la Sierra de La Giganta y valores de 1.0 a 2.0 en la zona conocida como Año Nuevo, porción central y la correspondiente a la de mayor extracción de uso agrícola, próximo a la desembocadura de la presa (figura 8).

De manera general se observa que la posición de los niveles del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes durante el lapso observado que comprende de 1992 a 2005.

Los abatimientos son puntuales y son originados por la concentración del bombeo en predios agrícolas en los que el abatimiento registrado oscila entre los 2 y 3 m, por lo que el ritmo anual de abatimiento varía entre los 0.15 y 0.25 m. Para el resto de la superficie el abatimiento promedio anual es de apenas algunos centímetros.

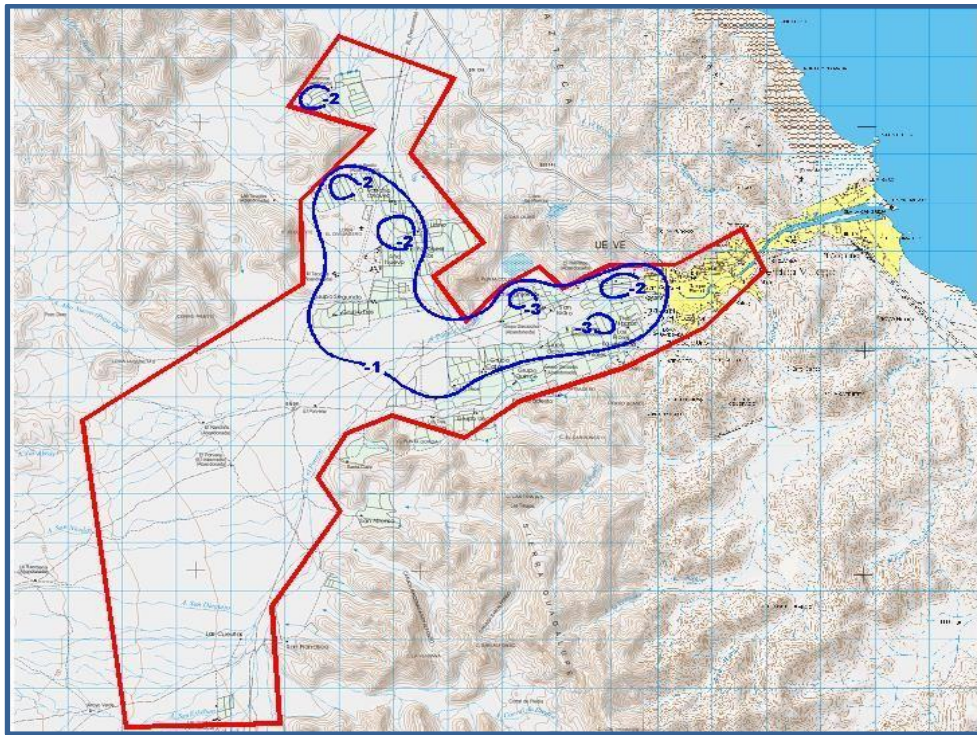


Figura 6. Evolución del nivel estático (m), 1992-2005.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Se realizaron análisis físico-químicos a 25 muestras de agua provenientes de aprovechamientos subterráneos: 3 para uso público-urbano, 21 para uso agrícola y uno para servicios (ubicado aguas abajo de la presa), que corresponden a la red de mediciones piezométricas que realiza al final de cada ciclo agrícola la CONAGUA.

Las concentraciones de sólidos totales disueltos en el caso del uso público-urbano no superan los 1,000 mg/l, en los de uso agrícola varía de 148 a 851 mg/l y en el pozo localizado aguas abajo de la presa encontramos la mayor concentración de sólidos totales disueltos con 1,800 mg/l.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída en el uso agrícola se clasifica como de salinidad baja (C1) a media (C2) y contenido bajo de sodio (S1), características que no imponen restricción alguna ni para el riego de los cultivos ni para los suelos de la región.

Los resultados indican de manera general, que la calidad química del agua es apta para todo uso.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el último censo de aprovechamientos realizado en el acuífero (2005), se inventariaron un total de 60 pozos, con la siguiente distribución por usos:

Uso	Agrícola	Dom-Abrev	Industrial	Pub. Urb.	Servicios
Número de pozos	41	14	1	3	1

De esta manera, el 68 % corresponde al uso agrícola, el 23 % al uso doméstico-abrevadero, 5 % para uso público-urbano, 2 % para servicios y el 2% restante para uso industrial.

El volumen de extracción conjunto asciende a los **7.1 hm³ anuales**, de los cuales 5.1 hm³ (72.3 %) son para uso agrícola, 1.9 más (26.7 %) para satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua potable a los centros de población, 0.05 (0.5 %) para uso doméstico-abrevadero y los 0.05 hm³ (0.5 %) restantes para el sector industrial.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo septiembre de 1992 a septiembre del 2005, en un área de balance de 68 km², que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La ecuación de balance propuesta para este acuífero es:

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

R_r = Retornos por riego;

B = Bombeo;

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

D_m = Descargas por manantiales;

ETR = Evapotranspiración;

ΔV(S) = Cambio de almacenamiento;

7.1 Entradas

La recarga natural está constituida por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle, de las infiltraciones a lo largo de los cauces del río y arroyos, y de la recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas laterales de sus fronteras serranas. La recarga total (R) al acuífero Mulegé está integrada básicamente por las entradas subterráneas (E_h), la recarga vertical (R_v) por lluvia y la recarga por retorno de riego por uso agrícola (R_r), aguas arriba de la presa la “Misión”.

7.1.1 Recarga Vertical (R_v)

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

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

7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación localizada en la planicie.

En el acuífero la recarga por flujo horizontal de aguas subterráneas ocurre en la zona comprendida entre la Montosa y Año Nuevo ubicada al Norte, así como en las fronteras laterales de La Sierra Guadalupe y Azteca, tal como se aprecia en la figura 5 que representan las curvas de igual elevación del nivel estático para el año 2005.

Con base en estas configuraciones se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero mediante la siguiente expresión:

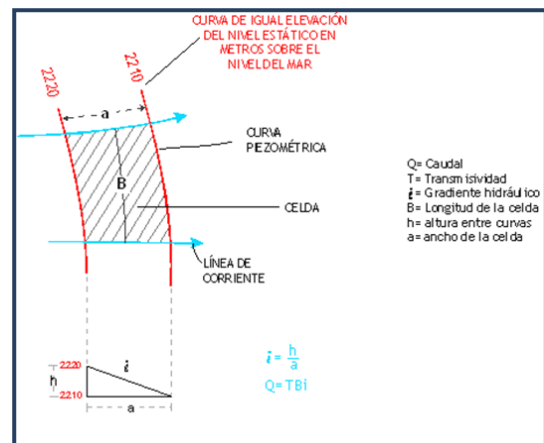
$$Q = B * i * T$$

Donde :

B: Largo del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$); h y a son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T: Transmisividad en el canal de flujo (m²/día)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos para 2005, obteniéndose un valor total de 6.2 hm³/año.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1600	350	0.4	0.0011	0.01	0.0183	0.6
E2	2000	450	0.4	0.0009	0.01	0.0178	0.6
E3	2500	350	0.4	0.0011	0.01	0.0286	0.9
E4	1750	220	0.2	0.0009	0.01	0.0159	0.5
E5	1600	250	0.2	0.0008	0.01	0.0128	0.4
E6	1300	180	0.2	0.0011	0.01	0.0144	0.5
E7	1400	180	0.2	0.0011	0.01	0.0156	0.5
E8	2200	450	0.4	0.0009	0.01	0.0196	0.6
E9	2200	220	0.5	0.0023	0.01	0.0500	1.6
TOTAL							6.2

Los valores de Transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son promedio y fueron tomados de los estudios del Valle de San Bruno, Mulegé y Santa Rosalía en el territorio de Baja California, realizado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A. y de la Actualización del Estudio Geohidrológico Cuenca Mulegé, B.C.S. realizado por la empresa Clarión, S.A. en 1980.

7.1.3 Retornos de riego (Rr)

En la región el usuario mayor es el sector agrícola con volumen de 5.1 hm³/año. En la zona agrícola ubicada aguas arriba de la presa se manifiesta un retorno de los excedentes del riego al subsuelo mediante una recarga inducida del orden del 10% que se infiltra a través de los materiales aluviales característicos dentro del valle. Se considera un 10% de retornos de riego del volumen total usado en el sector agrícola. Por lo tanto, se tiene un valor **Rr = 0.5 hm³/año.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el vaso de la presa (Sh), la evapotranspiración (ETR) y el manantial (Dm) que descarga aguas abajo de la presa como flujo base hacia el estero que conecta con el agua de mar.

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, 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). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

En toda el área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración Real es de 121.8 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 22.8° C y precipitación de 116 mm.

El valor bajo de precipitación (116 mm anuales), invalida la utilización de métodos empíricos para el cálculo del ETR (Turc, Coutage, etc.). Por tal motivo, para fines del cálculo de dicho valor que resulta trascendente por la presencia del agua freática en la presa la “Misión” y considerando su interrelación con los niveles estáticos someros menores a los 10 m de profundidad como se podrá observar en el plano de profundidad del nivel estático para el año 2005 de las figura 4, se considera que actúa una evapotranspiración potencial promedio de 2,173 mm, que resulta de los valores de fluctuación de 1,789 a 2,557 mm señalado en la figura 7.

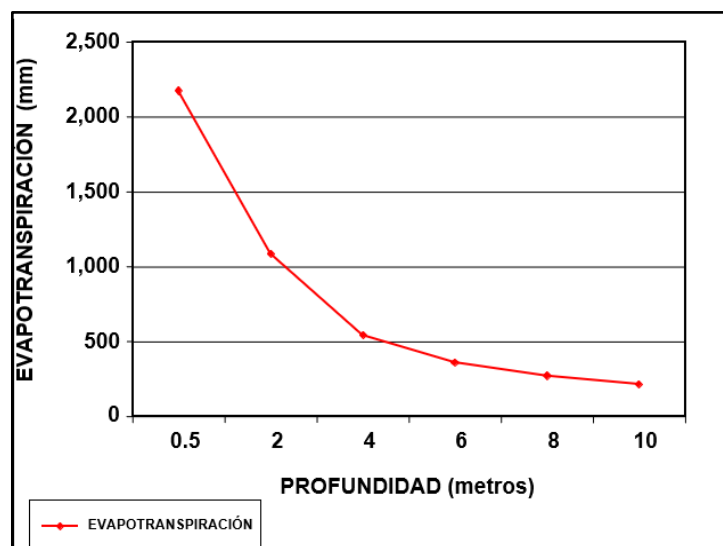


Figura 7. Comportamiento de la Evapotranspiración Real con la profundidad

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido (tabla 4): de la configuración de profundidad al nivel estático mostrada en la figura 4, correspondiente a septiembre del 2005, se consideran las curvas menores e iguales a 10 m, se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (entre las curvas de 10 y 6 m un valor promedio de la evapotranspiración de 289.73 mm y que multiplica al área de $3 \times 10^6 \text{ m}^2$, resultando 0.87×10^6 , por ejemplo).

El resultado de multiplicar el valor promedio de la evapotranspiración por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación expuesta en la figura 7, lo mismo se hace para las curvas de 6 a 1 y al final se obtiene que la suma de los volúmenes de evapotranspiración como se señala en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración.

PROFUNDIDAD (m)	Evapotranspiración (mm)	ÁREA (m ²)	VOL. EVAPOT. (m ³)
10 a 6	217.3 a 362.16	3×10^6	0.87×10^6
6 a 1	362.16 a 2,173	0.3×10^6	0.38×10^6
ETR:			1.25×10^6

El volumen de evapotranspiración estimado para el periodo es de 1.25 hm^3 , para fines del balance se utilizará el valor de **ETR = $1.2 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría la extracción de agua subterránea en el área es del orden de **$7.1 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Salidas subterráneas que ocurren como descarga hacia el mar fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas para 2005, a partir también de la configuración de elevación del NE presentado en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal.

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1300	450	0.5	0.0011	0.01	0.0144	0.5
TOTAL							0.5

El valor estimado promedio para el periodo es de **0.5 hm³ anuales**.

7.2.4 Descarga por manantiales (Dm)

Las salidas a través de manantiales están evaluadas en **1.6 hm³/año**.

7.3 Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$

Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático para el periodo de septiembre de 1992 a septiembre de 2005 (figura 6), y considerando un coeficiente de almacenamiento de $S = 0.2$.

Obtenido del estudio de la empresa Clarión S.A. en 1980, se determinó la variación del almacenamiento con la siguiente expresión:

$$\Delta VS = S * A * h$$

Donde:

ΔVS = 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 (km²);

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

El cambio de almacenamiento promedio anual calculado en dicho periodo es de -0.30 hm³, como se muestra en la tabla 6. Se considera que el trazo de las curvas de igual evolución está apoyado en valores puntuales negativos; además el cambio de almacenamiento está influenciado por la concentración de aprovechamientos dentro de la zona de mayor extracción para uso agrícola que se localiza próximo a la descarga subterránea hacia el vaso de la presa.

Tabla 6. Evolución del periodo de septiembre de 1992 al 2005.

Evolución (m)	Abatimiento (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)(\text{hm}^3/\text{año})$
<0	0.0	49.8	0.2	0.000
-1	-1.0	17.2	0.2	-3.400
-2	-2.0	0.7	0.2	-0.300
-3	-3.0	0.3	0.2	-0.200
	TOTAL	68.0	TOTAL	-3.9
		Promedio anual		-0.3

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical (Rv) por lluvia y por las infiltraciones a lo largo del cauce del río, mediante la expresión (2):

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

$$Rv = 0.5 + 7.1 + 1.6 + 1.2 - 0.3 - 6.2 - 0.5$$

$$Rv = 3.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera la recarga total media anual (R) es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = Rv + Eh + Rr$$

$$Rv = 3.4 + 6.2 + 0.5$$

$$R = 10.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido 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:

$$DMA = R - DNC - VEAS$$

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, tanto en forma de recarga natural (9.6) como inducida (0.5). Para este caso, su valor es de **10.1 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando la salida subterránea (Sh) que alimenta al vaso de la presa, la descarga del manantial (Dm) hacia aguas abajo de la presa comprometido como caudal base de agua superficial alimentados por el acuífero, más las descargas generadas por la Evapotranspiración Real (ETR) que está presente en profundidades menores a los 10 m del nivel estático e interrelacionado con el nivel freático de la presa.

Para el caso del acuífero, este valor es de **3.3 hm³ anuales**, de los cuales 0.5 hm³ corresponden a las salidas subterráneas hacia el vaso de la presa que se deben dejar escapar para mantener el nivel freático prevaleciente, más 1.6 hm³ de la descarga del manantial comprometida como flujo base de agua superficial debe drenar hacia aguas abajo de la presa para sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad a la unidad hidrogeológica y adicionalmente 1.2 hm³ de evapotranspiración real que está presente a profundidades menores de 10 m del nivel estático del acuífero y próximo al nivel freático de la presa la Misión, dentro de la zona agrícola.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **6,317,085 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, 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.

$$\text{DMA} = R - \text{DNC} - \text{VEAS} \quad (3)$$

$$\text{DMA} = 10.1 - 3.3 - 6.317085$$

$$\text{DMA} = 0.482915 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **482,915 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1974. Informe Final del Estudio Geohidrológico del Valle de San Bruno, Mulegé y Santa Rosalía, Territorio de Baja California. Realizado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (Tomo I y II).