



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MEZQUITAL SECO (0305), 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	4
3 FISIOGRAFÍA	7
3.1 Provincia fisiográfica	7
3.2 Clima	8
3.3 Hidrografía.....	9
3.4 Geomorfología.....	10
4 GEOLOGÍA	10
4.1 Estratigrafía	12
4.2 Geología Estructural	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5 HIDROGEOLOGÍA	18
5.1 Tipo de acuífero.....	18
5.2 Parámetros hidráulicos	18
5.3 Piezometría	18
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del Nivel Estático	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	21
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
7.1 Entradas.....	22
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.2 Salidas.....	24
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.2.3 Bombeo (B).....	27
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	27
8 DISPONIBILIDAD	28
8.1 Recarga total media anual (R)	29
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	29
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)	30
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-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 Mezquital Seco, definido con la clave 0305 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción central del estado de Baja California Sur, entre los paralelos 25° 39' y 26° 04' de latitud norte y los meridianos 111° 32' y 112° 06' de longitud oeste; abarcando una superficie de 948 km² (figura 1). Limita al norte con el acuífero La Purísima, al este con los acuíferos San Juan B. Londó y Santo Domingo, al sur con el acuífero Santo Domingo y al oeste con el Océano Pacífico.

Geopolíticamente se encuentra ubicado casi en su totalidad en el municipio Comondú; su extremo noreste se localiza en el municipio Loreto.

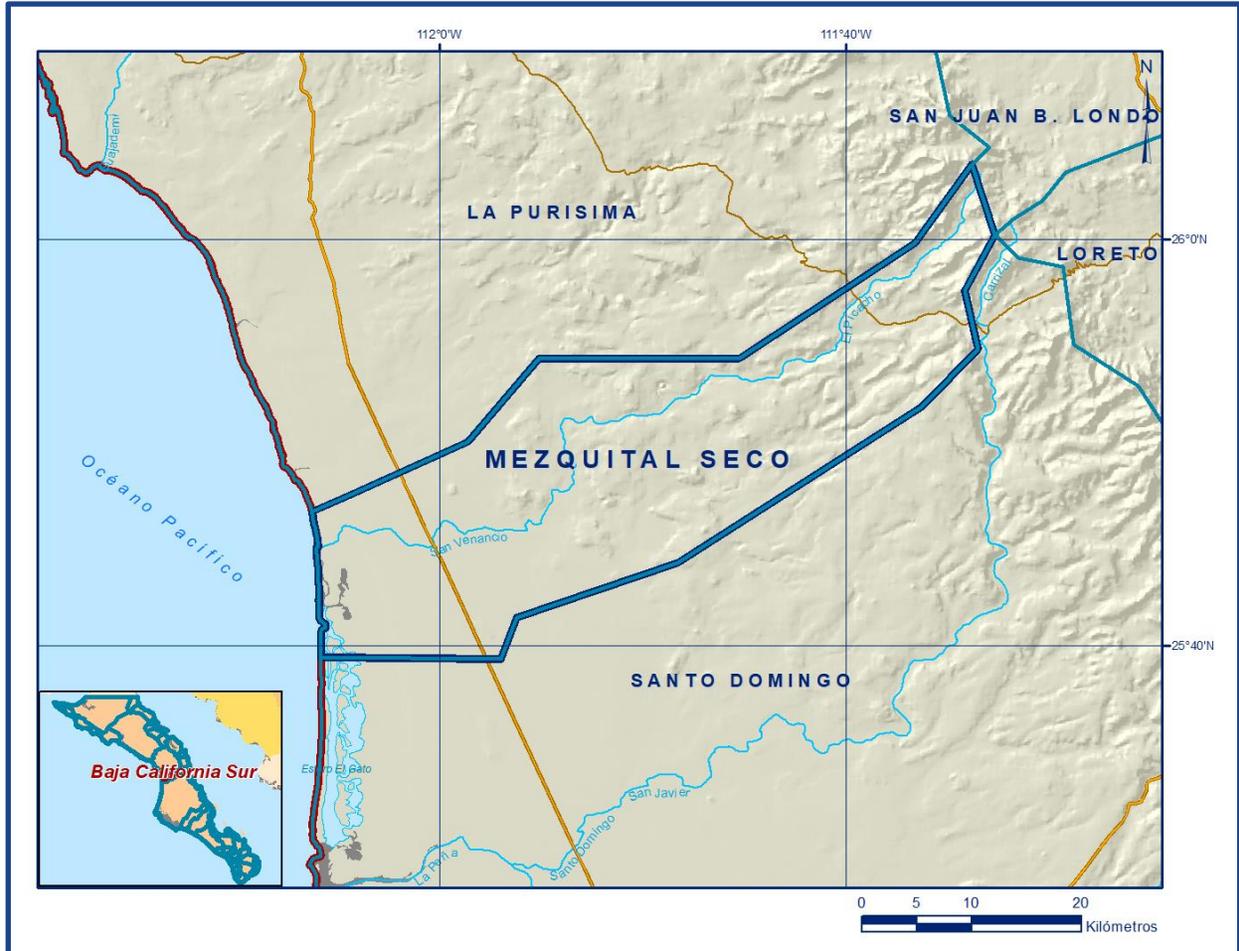


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0305 MEZQUITAL SECO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	III	58	34.9	25	50	12	
2	III	55	6.8	25	54	6.7	
3	III	45	15.9	25	54	8.5	
4	III	36	36.8	25	59	49.7	
5	III	33	51.1	26	3	43.2	
6	III	32	43.4	26	0	13.9	
7	III	34	11.5	25	57	27.7	
8	III	33	32.1	25	54	36.1	
9	III	36	17.1	25	51	45.4	
10	III	48	16.4	25	44	4.4	
11	III	56	12.3	25	41	23.0	
12	III	56	59.0	25	39	19.8	
13	12	5	48.6	25	39	24.4	DEL 13 AL 14 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
14	12	6	15.7	25	46	35.0	
15	12	4	33.5	25	47	20.7	
1	III	58	34.9	25	50	12	

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El acuífero, pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Baja California Sur. Su territorio 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 que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el acuífero no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Baja California Sur.

5 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero Mezquital Seco se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOFÍSICO REALIZADO EN LA CUENCA MEZQUITAL, SECO MUNICIPIO DE COMONDÚ, B. C. S. Realizado por el Ing. Enrique Woge para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, en 1980. Mediante la ejecución de sondeos geofísicos de resistividad identifica las estructuras y geometría de las distintas unidades que conforman el subsuelo, que sirvieron para identificar las unidades con mejores características para almacenar y transmitir el agua subterránea.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA CUENCA DE MEZQUITAL SECO, B.C.S. Realizado por la empresa Clarión, S. A. Planeación de Agua, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, en 1980-1981. El objetivo de este estudio fue evaluar la disponibilidad del agua subterránea, conocer la condición de explotación del acuífero y recomendar políticas óptimas de explotación para evitar la intrusión marina.

Incluyó actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría, toma de 11 muestras de aguas subterráneas para análisis fisicoquímicos y ejecución de 14 pruebas de bombeo, cuya interpretación arrojó un valor promedio de transmisividad de $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Concluye que el potencial del acuífero es bajo y que la extracción que se realiza mediante los 14 aprovechamientos censados era mayor a la recarga que recibe el acuífero; recomienda deducir el bombeo gradualmente a lo largo de los próximos 10 años restringir el uso a cultivos de bajo consumo de agua y realizar obras encaminadas a propiciar la infiltración del agua de lluvia.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE PROSPECCIÓN EN EL ÁREA DE MEZQUITAL SECO, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR. Realizado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, en 1981. El objetivo de este estudio fue la prospección geohidrológica para determinar si existe continuidad hidrogeológica entre este acuífero y Santo Domingo.

Comprendió actividades de campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, interpretación de cortes litológicos y ejecución de 15 sondeos eléctricos verticales (SEV's) y aforo de pozos.

Mediante las secciones geoelectricas define tres unidades que son correlacionables con las unidades hidrogeológicas e identifica una zona permeable de 115 metros de espesor, pero de potencial bajo. Los depósitos fluviales también presentan escaso potencial debido a su reducido espesor.

Concluye que el agua subterránea de las norias es de mejor calidad que la de los pozos profundos debido a que estos últimos perforaron formaciones geológicas de origen marino. Recomienda realizar aforos y pruebas de bombeo en pozos recientemente construidos y estudiar la zona conocida como “La Junta”, donde existen condiciones de recarga, así como perforar pozos exploratorios.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS CABO PULMO, CABO SAN LUCAS, MEZQUITAL SECO, LA PURÍSIMA, SANTA ÁGUEDA Y SANTA ROSALÍA, B.C.S. Elaborado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S.A. de C.V. en 2010. El objetivo de este tipo de estudios es establecer una red de pozos de monitoreo para la medición sistemática de los niveles del agua subterránea. Incluye actividades de censo de aprovechamientos, piezometría y nivelación de brocales.

ESTUDIO PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS LA PURÍSIMA, MEZQUITAL SECO, CABO SAN LUCAS, CABO PULMO, SAN BARTOLO, SANTA ÁGUEDA Y SANTA ROSALÍA, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR. Elaborado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2010. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Estos dos últimos estudios fueron básicos para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Erwin Raisz (1964), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Baja California, dentro de la Subprovincia Tierras Bajas, caracterizada por una topografía de mesetas basálticas orientadas en dirección noroeste-sureste basculadas suavemente hacia el este y oeste, con altitudes que varían de 100 a 540 m, terrazas alargadas de material piroclástico, abanicos y llanuras constituidas por areniscas, coquinas y diatomitas que conforman las áreas de menor elevación.

De acuerdo con el INEGI (1997), se ubica en la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, la cual se divide en la Subprovincia Sierra La Giganta y en las Discontinuidades Desierto de San Sebastián Vizcaíno, Llanos de La Magdalena y Del Cabo. La porción oriental del acuífero Mezquital Seco se ubica entre la Subprovincia Sierra La Giganta y la región occidental en la Discontinuidad Llanos de La Magdalena.

La Provincia Península de Baja California, ubicada en el noroeste de la República Mexicana, se extiende a lo largo de 1,333 km, con rumbo noroeste-sureste.

Las mayores elevaciones, de 2,000 a 3,000 msnm, se encuentran en las sierras de la porción norte.

La Subprovincia Sierra La Giganta es una cordillera montañosa orientada en dirección preferencial noroeste-sureste, que forma parte de la cordillera peninsular cuya topografía se caracteriza por presentar elevaciones máximas del orden de 800-1680. Está formada por rocas volcánicas de la Formación Comondú, dispuestas en forma de mesetas inclinadas hacia el Océano Pacífico y altas crestas hacia el Golfo de California.

La Sierra La Giganta define el parteaguas en esta porción de la península de acuerdo con sus dimensiones y posición geográfica. Los escurrimientos forman una serie de cañones profundos los cuales drenan con una dirección preferencial hacia el occidente. Las topofomas que se presentan son i) sierras altas complejas con mesetas, ii) sierras bajas que constituyen la cordillera desde Santa Rita, El Chollero, Ley Federal de Aguas 2, hasta Santa Rosa y iii) lomeríos ramificados con bajadas en la parte noroeste, este y sudeste.

La Subprovincia Llanos de La Magdalena está situada en la parte centro-oeste del estado. Fisiográficamente presenta una depresión que ocupa una superficie de 16,756 km². La porción noroeste y más de la mitad de la zona costera están formadas por llanuras con dunas, en tanto que hacia los límites con la sierra se localizan algunas bajadas y lomeríos. Su característica principal es la presencia de afloramientos de sedimentos terciarios marinos.

Las topoformas presentes corresponden a un terreno plano con un suave declive hacia la costa en la parte central, en donde se localiza una serie de lomeríos ramificados con bajadas que se observan en la porción sureste del área, cuyas elevaciones no sobrepasan los 100 msnm. Al occidente se presenta la topoforma de llanura aluvial de piso rocoso surcada por el arroyo de San Venancio; está constituida principalmente por sedimentos marinos y continentales cubiertos por reducidos espesores de depósitos fluviales y eólicos.

3.2 Clima

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones climatológicas que se ubican en esta porción de la península de Baja California, y con apoyo en la carta de climas, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García para nuestro país, se determina que en la región prevalece grupo de climas secos y áridos (BW).

De acuerdo a la elevación topográfica de la zona, se presentan variantes en franjas paralelas orientadas en sentido norte sur: En las partes topográficamente más bajas cercanas a la línea de costa es clima es de tipo BW_{hs} muy árido semicálido, con régimen de lluvias en invierno, en el que la precipitación invernal es mayor al 36% del total de la lluvia anual, temperatura media anual de 20.8°C, y la temperatura máxima del mes más cálido es mayor a los 22 °C y la menor del mes más frío es menor a los 18°C.

En la porción central es de tipo BW (h´)(x) muy árido, cálido con lluvias repartidas en todo el año y lluvias invernales representan el 18% de la lluvia total anual, temperatura media anual mayor de 22°C; temperatura máxima del mes más cálido mayor a los 22 °C y la menor del mes más frío es menor a los 18°C. Por último en la sierra predomina el clima BW_h(x) muy árido semi-cálido.

La temperatura media anual es de 18°C, temperatura máxima del mes más cálido mayor a los 22 °C y la menor del mes más frío menor a los 18°C, con máxima de 46°C para el mes de octubre y una mínima de 0°C para los meses de febrero.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de tres estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: San Javier, Comondú y La Poza Grande, cuyo registro comprende los periodos 1953-2007, 1938-2007 y 1941-2007, respectivamente. Debido a que el área de balance se encuentra emplazada en la planicie del acuífero, únicamente se consideran los registros de la estación La Poza Grande.

De acuerdo con estos datos, se obtuvieron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **66.8 mm y 20.1°C**, respectivamente. Debido a la falta de datos de evaporación potencial en la estación La Poza Grande, se considera en valor **1,749 mm anuales**, registrados en la estación vecina Comondú. La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de tormentas tropicales y huracanes.

Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de fenómenos ciclónicos, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 3 denominada Baja California Suroeste (Magdalena), cuenca “Arroyo Venancio-Arroyo Salado”.

Debido al clima desértico, los principales escurrimientos de la región son de régimen intermitente, entre los cuales se encuentran los arroyos La Poza, San Venancio y Jardín, que descienden desde la Sierra La Giganta hacia los llanos en sentido noreste-suroeste y sólo conducen agua durante las esporádicas lluvias torrenciales como las causadas por huracanes. La red de drenaje presenta un patrón dendrítico.

La cuenca hidrológica “Mezquital Seco”, tiene una superficie de aportación de 1,480 km² y se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica La Purísima, al este por la cuenca hidrológica San Juan B. Londó, al sur por la cuenca hidrológica Santo Domingo y al Oeste por el Océano Pacífico.

En la zona no existen estaciones hidrométricas ni tampoco infraestructura hidráulica para el almacenamiento y control de las corrientes superficiales.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos de la región, se infiere que se trata de un bloque levantado cuya pendiente hacia el poniente es mucho más suave que hacia el Golfo de California. Los rasgos morfológicos en el área de estudio denotan un estado de madurez temprana, en el que destacan las sierras constituidas por rocas volcánicas erosionadas de la Formación Comondú, con desnivel de más de 1,400 m y fuertes pendientes que terminan en acantilados sobre el Golfo de California. En ella nacen los 3 arroyos principales que drenan hacia el Océano Pacífico.

La red de drenaje característico de tipo dendrítico presenta cauces generalmente profundos en la zona serrana, más amplios y planos en la zona de valle y planicie costera, tendiendo a formar meandros. A nivel regional, desde el punto de vista geomorfológico, se observan en la franja costera terrazas, barras e islotes que atestiguan rasgos de una regresión marina; en la porción Norte y este la erosión fluvial ha originado cañones y profundos barrancos; en la porción central y occidental existen lomeríos, mesetas basálticas y terrazas alargadas.

De manera particular, en el área del acuífero se distinguen unidades geomorfológicas clasificadas como Sierras Altas, Sierras Bajas, Valle Aluvial, Abanicos Aluviales y Planicie Costera. Los rasgos geomorfológicos en la zona centro del acuífero, presentan condiciones poco favorables para el desarrollo de un acuífero debido a los derrames basálticos compactos que predominan en la zona.

La planicie costera comprende casi una tercera parte de la superficie del acuífero, se sitúa en toda la franja próxima al Océano Pacífico y está constituida por sedimentos marinos, materiales de acarreo y sedimentos eólicos.

4 GEOLOGÍA

Las unidades litológicas que afloran en la región se relacionan con la apertura del Proto Golfo de California que formó una serie de cuencas divergentes, las cuales almacenaron sedimentos de la Formación Tepetate a fines del Eoceno producto de una emersión que marcó el comienzo de un periodo de erosión y plegamiento local (figura 2).

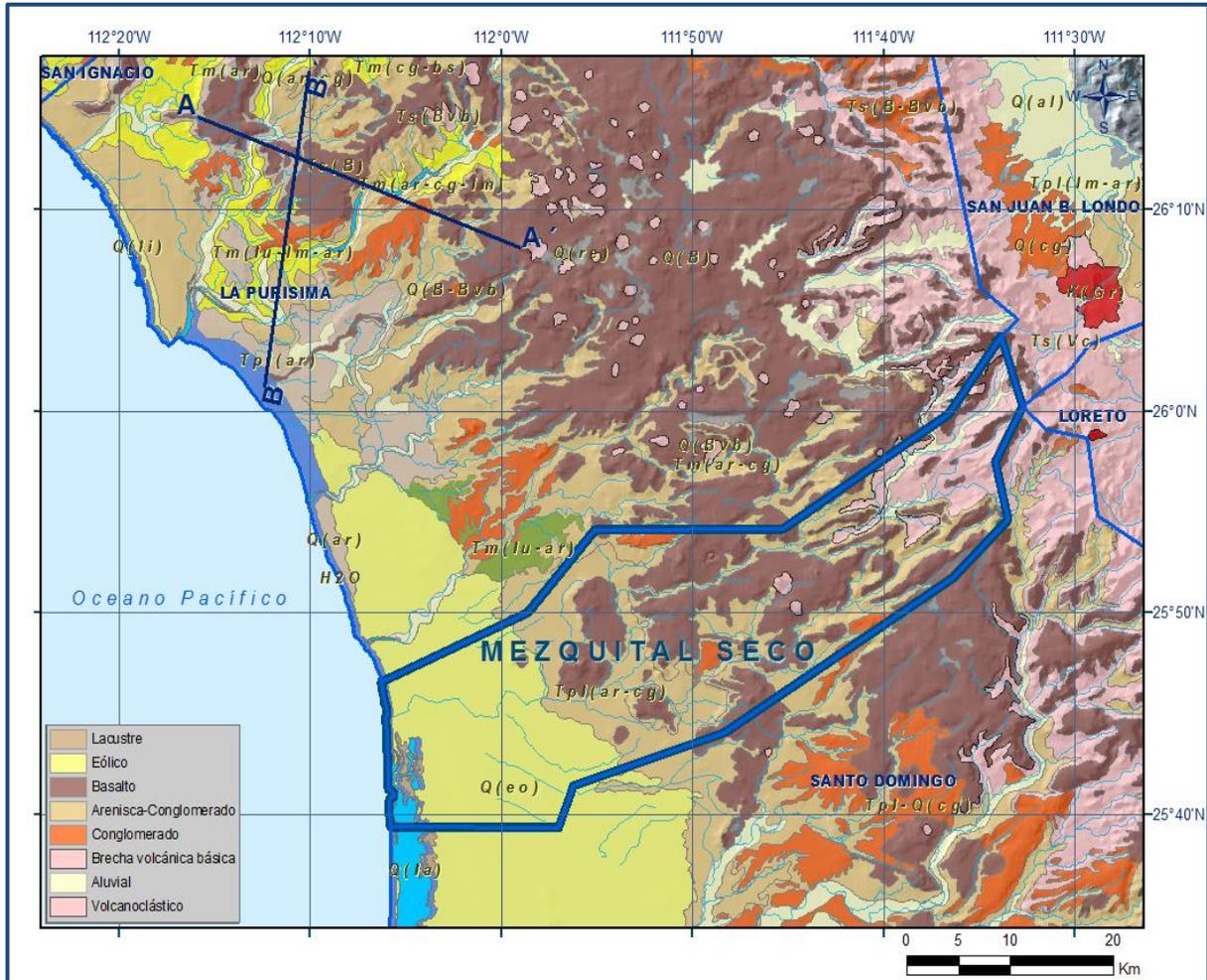


Figura 2. Geología general del acuífero

En el Oligoceno se presenta una discordancia por falta de depósitos de origen marino debido a un levantamiento general; posteriormente se presenta una transgresión durante la cual se inicia el depósito de los sedimentos de la Formación El Cien, que parece haberse formado en una cuenca somera de poca extensión y circulación.

Al finalizar el Mioceno comenzó una intensa actividad volcánica en zonas de fracturamiento incipiente, a lo largo de un eje de fallamiento paralelo, al borde de la actual costa oriental de la Península de Baja California. Esta actividad volcánica dio origen a la Formación Comondú la cual forma la Sierra La Giganta, conformada por más de 1,200 metros de espesor de sedimentos volcánicos que se depositaron sobre las rocas graníticas del batolito peninsular.

Durante casi todo el Pleistoceno, la erosión de las tierras altas del poniente acumuló grandes cantidades de sedimentos en la plataforma submarina o zona de mar epicontinental, en este periodo se depositó la Formación Salada la cual está constituida por areniscas de grano medio a fino con algunas intercalaciones de material arcilloso con gran contenido de fósiles. Durante el Cuaternario predominó una etapa de erosión de las rocas, los sedimentos originaron los diferentes tipos de rellenos aluviales encontrados en los cauces de los arroyos y en una pequeña área de la zona cercana a la costa (figura 2).

4.1 Estratigrafía

La geología general del acuífero está compuesta por rocas volcánicas y sedimentarias, cuyo registro estratigráfico abarca del Paleoceno al Reciente. Se describen a continuación las distintas unidades, de la más antigua a la más reciente.

Formación Tepetate

Constituyen la unidad más antigua que aflora dentro de la zona. Fue descrita por Heim Arnold (1922), asignándole edad de Paleoceno Superior-Eoceno Superior Temprano. La parte basal de esta formación está compuesta por areniscas, limolitas y fangolitas que afloran en la región del arroyo Santa Rita y Colorado, donde los estratos reflejan depósitos siliciclásticos en aguas profundas. En el poblado El Cien la secuencia está compuesta por intercalaciones de fangolita, limolita y arenisca.

Los afloramientos ubicados más al sur y norte (Paleoceno Superior-Eoceno Medio) están constituidos por fangolitas, limolitas, areniscas fosilíferas y calcarenitas, indicando ambiente con sedimentación mixta siliciclástica-calcárea en la plataforma continental externa e interna. Los depósitos sedimentarios de esta Formación se encuentran expuestos en la porción norte del acuífero; en las márgenes de los arroyos Hondo, El Aguajito, Los Mezcales, El Conejo, El Datilar y Guadalupe, sobreyacidos por depósitos sedimentarios de la Formación El Cien. Los horizontes arenosos pueden constituir un acuífero regional profundo, que debido a la escasa recarga que recibe generalmente es de bajo rendimiento. Además, la calidad del agua es muy variable.

Formación El Cien (Miembro San Juan y Cerro Colorado)

La Formación El Cien (antes llamada Formación San Gregorio y Formación San Isidro) sobreyace a la Formación Tepetate, tiene una edad del Oligoceno Superior a Medio Inferior.

Está compuesta de sedimentos marinos clásticos con un espesor que varía de 125 a 175 m y consiste en los miembros San Juan y Cerro Colorado (Fischer et al 1995). El Miembro San Juan está compuesto por rocas tobáceas y frecuentemente por lutitas, areniscas, limolitas fosfáticas, conglomerados y tobas, reflejando un ambiente de depósito que se extiende desde la costa hasta la plataforma abierta.

El Miembro Cerro Colorado está compuesto por areniscas conglomeráticas intercaladas con areniscas coquinoideas, limolitas, areniscas con fosfato retrabajado y en menor proporción lutitas silicificadas con horizontes de tobas. Heim (1922) definió informalmente como Formación San Isidro a limolitas, areniscas y coquinas de origen marino. Autores posteriores (Mina, 1957; Hausback, 1984; Kim, 1987) utilizaron este nombre para estratos que afloran más al sur, en la zona cercana de la ciudad de La Paz.

Otros autores se refieren a la Formación El Cien como Formación San Isidro y la describen integrada por una secuencia de rocas sedimentarias de origen marino y vulcanosedimentarias de origen continental de un típico color verdoso.

Schwennicke (1992) enumeró y describió a los diferentes ambientes de depósitos en los que se formaron los sedimentos del miembro San Juan. Llega a la conclusión de que el nombre más apropiado y la unidad litológica que mejor describe a las rocas que afloran en San Juan de la Costa, El Cien y el Aguajito es el miembro San Juan de la Formación El Cien.

La sedimentación fue controlada por el levantamiento relativo del nivel del mar y una fuerte influencia terrígena. Los principales afloramientos encontrados dentro de la zona son los situados al Norte, Este y Sur de la localidad de San Hilario.

Formación Comondú

Aflora formando la Sierra La Giganta cuyo origen se asocia a un arco volcánico del Oligoceno-Mioceno (Heim Arnold, 1922). Comprende una alternancia de materiales volcánicos y sedimentarios que incluye areniscas, conglomerados, brechas volcánicas, andesitas y tobas.

Las areniscas se presentan bien consolidadas y compactas, en tanto que los conglomerados están constituidos por fragmentos redondeados, de origen ígneo, empacados en arenas.

Ambas litologías se encuentran complejamente interestratificadas e intrusionadas por diques de composición intermedia y básica. Las tobas y brechas presentan una composición predominantemente básica.

Las brechas están constituidas por una mezcla de fragmentos, empacadas en una matriz tobácea, intrusionadas por diques. Esta formación se presenta en la mayor parte de las elevaciones topográficas que corresponden a la Sierra La Giganta, con una estratificación casi horizontal, y una sensible inclinación hacia el poniente.

Su espesor se estima en más de 1,200 metros. Federico Mina (1957) la dividió 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, que subyace a la anterior, está formada principalmente por conglomerados, areniscas y ocasionales argilitas. A través del fracturamiento recarga lentamente el agua retenida durante las lluvias hacia la zona baja, donde se localizan los rellenos aluviales del Cuaternario.

Formación Salada

La Formación Salada fue definida formalmente por Heim (1922) quien le asigna edad del Plioceno de acuerdo con los restos fósiles encontrados. Menciona que se encuentra expuesta a lo largo de la costa del Pacífico, desde el área de Todos Santos hasta el arroyo Santa Rita. Su estratificación presenta un ligero echado hacia el Océano Pacífico. Está compuesta por areniscas de grano medio a fino con algunas intercalaciones de arcilla, limolitas, coquinas y un gran contenido de fósiles.

Estos depósitos reflejan una interacción entre un levantamiento del nivel del mar, la proliferación de sedimentos y las modificaciones permanentes del ambiente costero (Schwennicke *et al.* 2000). Este autor le asigna una edad del Mioceno. La gran variedad de fósiles: moluscos, dientes de tiburón y batoideos, indica aguas someras y cálidas. Los afloramientos de la Formación Salada se localizan en las inmediaciones del Rancho San Rafael de los Inocentes, El Progreso, La Aguja y La Ballena.

Depósitos Cuaternarios

Está representado por derrames de basaltos compactos de color gris oscuro, textura porfídica a afanítica, así como brechas intermedias que consisten de fragmentos de basaltos, cenizas y piroclastos.

Los depósitos cuaternarios están constituidos por depósitos aluviales, fluviales, lacustres y eólicos. Los depósitos aluviales y fluviales se restringen a los cauces de los arroyos y están formados por sedimentos de granulometría variable: arenas, gravas, limos y arcillas; en tanto que los depósitos eólicos cubren la mayor parte de la planicie costera, sobreyaciendo a sedimentos marinos terciarios; en la zona costera forman dunas. Los sedimentos eólicos se depositaron alrededor de las pozas del estero San Jorge. En la tabla 2 se presentan las principales características hidrogeológicas de las unidades geológicas de la cuenca.

Tabla 2. Características de las unidades hidrogeológicas del acuífero

UNIDAD	TIPO DE MATERIAL	LOCALIZACIÓN	PERMEABILIDAD	FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO
Q(eo)	Suelos arenosos	Localizados en la planicie costera.	Buena permeabilidad.	Aunque son muy permeables, no constituyen acuíferos importantes.
Q(B)	Basaltos	Ubicados desde la parte alta, al este del acuífero, hasta el inicio de la planicie costera.	Impermeables, aunque en algunas zonas están fracturadas cambiando la permeabilidad.	No son productores de agua, pero reciben agua del depósito aluvial, fluyendo a través de las fracturas.
Q(al)	Aluvial	Se localizan en los cauces de los arroyos en una pequeña zona al este del acuífero.	Permeables.	Tiene características para formar acuíferos y es donde se ubican las captaciones de la zona.
Q(Bvb)	Rocas ígneas extrusivas Brechas volcánicas	Afloran en pequeñas zonas al centro del acuífero, entre los basaltos.	Impermeables.	No constituyen acuíferos.
Tm (ar-cg)	Areniscas y conglomerados	Se localizan sobre los basaltos. En el acuífero están distribuidos en la parte este y centro.	Permeable.	Posibilidad de formar acuíferos.
Tpl (ar-cg)	Areniscas y conglomerados	Se localizan en la parte central del acuífero de norte a sur y antecede a la zona costera.	Permeable.	Posibilidad de formar acuíferos.
Tpl-Q(cg)	Conglomerados	Pequeños afloramientos en el acuífero: al norte, al sur y sureste del acuífero.	Impermeables.	No constituyen acuíferos.
Ts (vc)	Rocas ígneas extrusivas volcanoclásticas	Aflora al noreste del acuífero.	Impermeable.	Forma una unidad hidrogeológica impermeable.

Fuente: Estudio hidrogeológico de prospección en el área de Mezquital Seco, (SARH,1977).

4.2 Geología Estructural

La historia tectónica del Golfo de California y provincias peninsulares es muy compleja debido al hecho de estar ubicadas sobre una margen continental que ha sido afectada por varios procesos de convergencia y divergencia. Sin embargo, dos importantes eventos tectónicos regionales están expuestos en la región.

Uno corresponde a la Orogenia Laramide (Cretácico Superior), responsable del movimiento compresivo producto del choque de la placa Farallón con la placa Norteamericana, lo que dio origen a la intrusión de grandes masas ígneas (parte del Batolito Peninsular), y presentan rasgos producidos por esfuerzos compresivos que generaron una deformación cataclástica dúctil, que pudo haber iniciado durante la fase terminal de la Orogenia Laramide, al final del Cretácico y que probablemente se reactivó con los posteriores procesos extensivos.

Un segundo evento tectónico se desarrolló del Mioceno Medio al Plioceno Temprano, cuando ocurrió la configuración del límite entre la placa Pacífica y la Placa Norteamericana, lo que dio origen al Golfo de California, por medio de movimientos oblicuos extensionales con orientación NW-SE, modelando de esta manera un relieve peninsular gobernado por bloques escalonados, con sensible basculamiento hacia el poniente y fallas laterales dextrales. Este periodo es muy importante en la región, ya que se le asocia a la intrusión de estructuras tabulares de diferente composición.

Estructuralmente el área del acuífero se comporta en forma de bloques escalonados, con sensibles basculamientos al noroeste y sureste, probablemente provocados por el emplazamiento del intrusivo andesítico interpretado a profundidad por estructuras dentro del ambiente sedimentario de la Formación San Gregorio se presentan anticlinales de amplio rango de curvatura, cuyos ejes se orientan en direcciones NW-SE y NE-SW.

La dirección principal de las fallas y lineamientos es NE-SW, donde destacan fallas normales, y una segunda orientación secundaria NW-SE. Los ambientes volcánicos y vulcanoclásticos son más afectados por la deformación. Localmente, en los arroyos La Purísima y San Gregorio se observan plegamientos volcados de reducidas dimensiones (Carta Geológica-Minera G12-A86, "San Isidro", SGM, 1996).

4.3 Geología del subsuelo

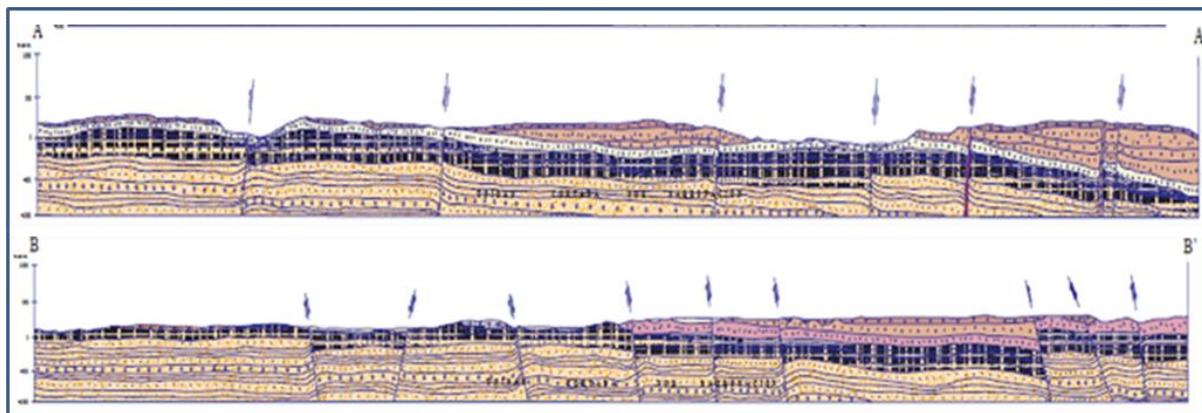
De acuerdo con la información de los cortes litológicos de pozos y las evidencias de campo es posible definir que el acuífero se aloja en los sedimentos aluviales y fluviales provenientes de la erosión de las partes altas de la Sierra La Giganta, que han sido transportados por los escurrimientos superficiales y depositados en los cauces de los arroyos y en la planicie costera.

Su espesor varía desde algunos metros, en los cauces de los ríos, hasta 80 m en la planicie costera y conforma un acuífero de baja capacidad de almacenamiento. Este es el acuífero que actualmente se explota; sin embargo, a mayor profundidad las rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas de las formaciones Comondú, Salada y El Cien tienen un potencial que no ha sido aún explorado.

En superficie el acuífero está constituido en su parte alta por rocas de origen volcánico provenientes de la Formación Comondú, tales como tobas, brechas volcánicas y basaltos. En su porción central predominan arenas, gravas, areniscas, conglomerados y caliches de la Formación El Cien y Salada, cuyo espesor se desconoce. La parte cercana a la costa está constituida por sedimentos eólicos, conglomerados, areniscas conglomeráticas y areniscas de grano medio a fino con pequeñas intercalaciones de arcilla y gran contenido de fósiles.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas de la Formación Comondú, al desaparecer el fracturamiento, y a mayor profundidad las lutitas y limolitas que forman parte de la secuencia que constituye la Formación Tepetate.

En la figura 3 se presentan dos secciones geológicas esquemáticas, ubicadas en el acuífero vecino al norte "La Purísima", que muestran la disposición de las unidades geológicas del subsuelo en esta porción de la península de Baja California Sur.



Fuente: Carta Geológica-Minera G12-A86 "San Isidro" Esc. 1:50 000 (SGM, 1996)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

6 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera. La granulometría de estos materiales varía de gravas a arcillas y su espesor promedio fluctúa entre 10 y 60 m, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y poca capacidad de almacenamiento.

Algunos aprovechamientos han alcanzado las facies permeables de las formaciones Salada y El Cien pero su potencial aún no ha sido explorado. El marco geológico general está conformado por rocas ígneas extrusivas, piroclásticas y sedimentarias de la Formación Comondú, de permeabilidad en general baja, y un paquete de rocas sedimentarias terciarias que funcionan como zonas de recarga al acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 5 pruebas de bombeo de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **0.232** a **4.17×10^{-3} m²/s**, con un valor promedio de **1.25×10^{-3} m²/s**, en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **0.000012** a **0.000208 m/s** con un valor promedio de **0.000067m/s**. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2010. No fue posible correlacionar las mediciones piezométricas de los pocos aprovechamientos censados en estudios previos.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático, mostrada en la figura 4, presenta valores que varían desde algunos metros, a lo largo de los arroyos y en la planicie costera, hasta los 34 m, aumentando gradualmente de la zona costera hacia las

estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, conforme se asciende topográficamente.

Los valores más someros se ubican en la parte baja del arroyo La Poza y en los alrededores del poblado La Poza Grande; en tanto que los más profundos se registran en el poblado Francisco Villa.

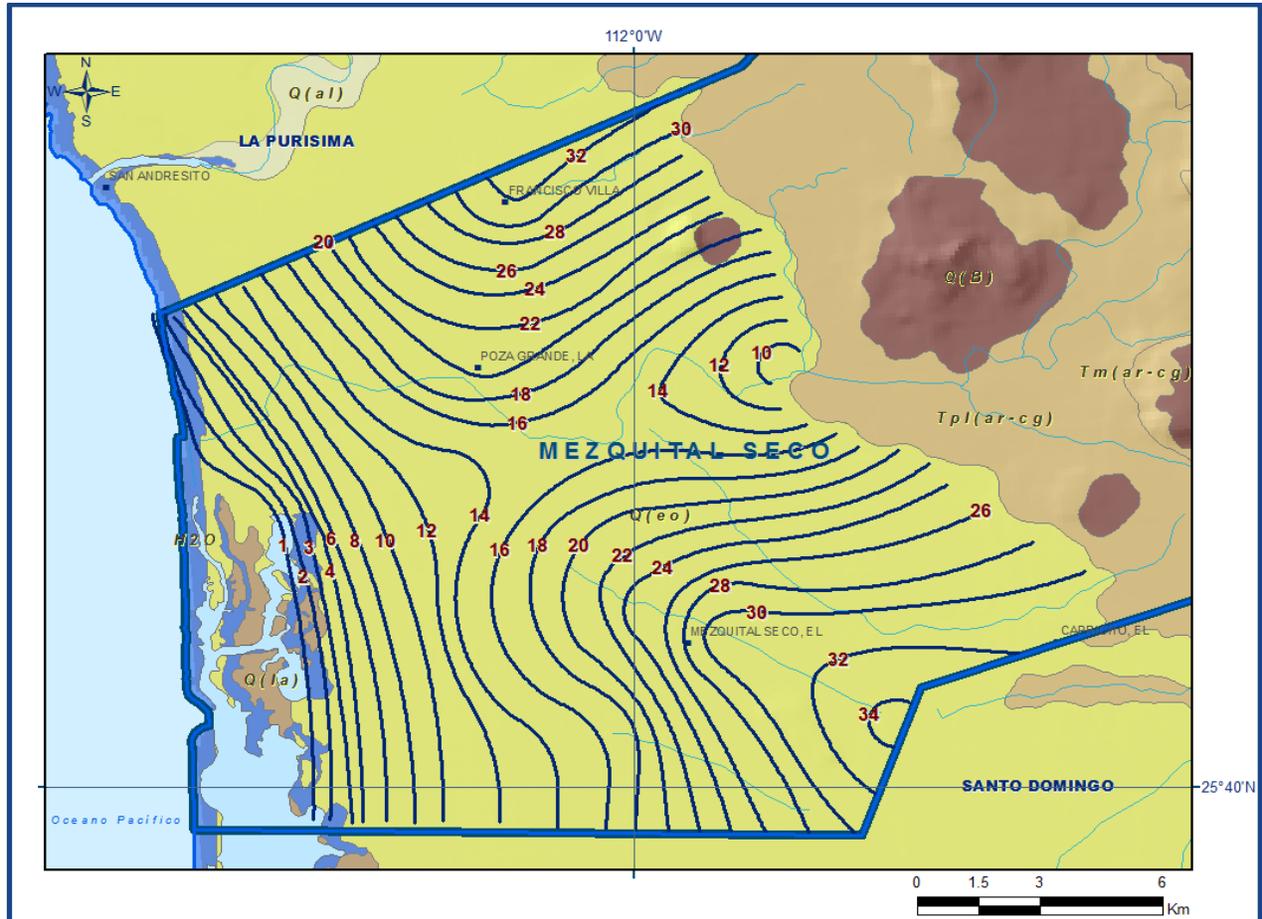


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático (Figura 5), se observa que los valores varían entre **0 y 13 msnm**, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

Los valores más bajos se localizan en la porción costera, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia la porción oriental, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de oriente al occidente.

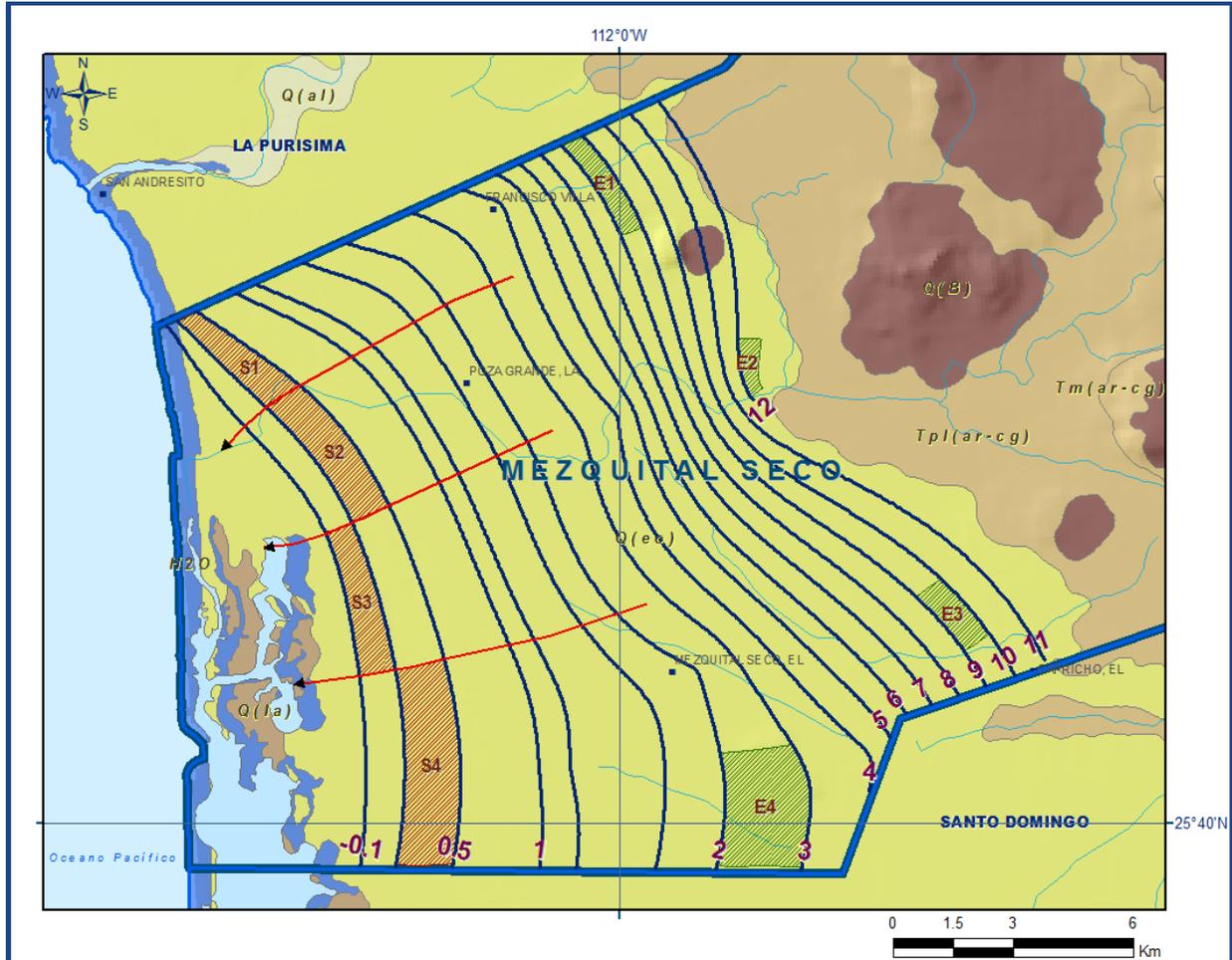


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010).

5.4.3 Evolución del Nivel Estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 7 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (5 pozos 1 noria y 1 estero), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero. De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 620 a 1420 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Valores superiores a las 1000 ppm se registran en algunos aprovechamientos ubicados en la zona costera. Las menores concentraciones se registran en los aprovechamientos localizados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo oriental del acuífero.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad alta (C_3) y muy alta (C_4) y contenido bajo a muy alto de sodio intercambiable (S_1 a S_4), lo que indica que sólo se pueden utilizar para riego con restricciones importantes, como la selección de plantas tolerantes a la salinidad y suelos con buen drenaje. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la Clorurada-Sódica, que refleja la influencia del agua marina.

7 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 18 aprovechamientos, de los cuales 11 son pozos y 7 norias; de ellos 14 están activos (8 pozos y 6 norias) y 4 inactivos.

El volumen de extracción se ha estimado en **1.8 hm³ anuales**, de los cuales 1.7 hm³ (94.4 %) se destinan al uso agrícola, 0.03 hm³ (1.7 %) para abastecimiento de agua potable a los centros de población y los 0.07 hm³ restantes (3.9 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

8 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010, en un área de **257 km²** del acuífero que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos.

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:

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

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:

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

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña. 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:

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

Donde:

E_h : Entrada por flujo subterráneo horizontal

R_v : Recarga vertical

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR : Evapotranspiración real

ΔV : Cambio de almacenamiento

S : Coeficiente de almacenamiento

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

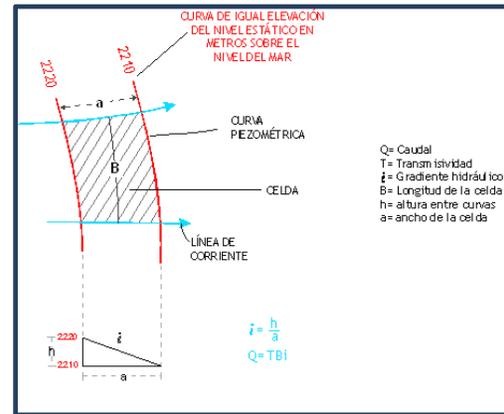
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico

T: Transmisividad en el canal de flujo



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 en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **0.6 hm³/año**

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

ENTRADAS HORIZONTALES					
CELDA	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
E ₁	1.430	2644.3	0.00188	0.0071	0.224
E ₂	1.430	1335.7	0.00223	0.0043	0.134
E ₃	1.820	1705.6	0.00140	0.0044	0.137
E ₄	1.690	2942.7	0.00056	0.0028	0.088
TOTAL					0.583

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

7.2 Salidas

Las descargas en el acuífero ocurren principalmente por evapotranspiración (ETR), bombeo (B), salidas por flujo subterráneo (Sh) hacia el mar y al estero San Jorge.

7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la elevación del NE del año 2010, mostrada en la figura 5. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación, hacia el mar. El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo.

SALIDAS HORIZONTALES					
CELDA	T (10^{-3} m ² /s)	B (m)	I (m/m)	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
S ₁	1.000	3033.4	0.0003	0.0009	0.027
S ₂	1.000	3539.1	0.0002	0.0008	0.024
S ₃	1.000	3668.3	0.0001	0.0005	0.016
S ₄	1.000	4924.7	0.0002	0.0008	0.026
TOTAL					0.093

El valor de las salidas subterráneas es igual a **0.1 hm³/año**.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración 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). En la zona de estudio la transpiración de la flora no es significativa por el tipo de vegetación.

Aunque el valor de la evapotranspiración se estima que es pequeño en este acuífero, dada la escasez natural del agua, se consideró importante estimar su valor para incluirlo en la recarga total que recibe el acuífero.

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$		$L = 300 + 25T + 0.05T^3$	
T (°C) =	20.1	P ² =	4462.24
P(mm)=	66.8	L ² =	1460544.88
L=	1208.5301		
ETR (mm) =	70.3		

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. Entonces debido a que la precipitación resultó menor que la relación 0.31L=374.6, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor valor de la precipitación.

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la escasa presencia de cobertura vegetal.

Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos <100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973) figura 6.

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 3 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (1749 mm CONAGUA, Dirección Local en Baja California Sur).

El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático.

De la figura 6 se deduce que para una profundidad al NE de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%.

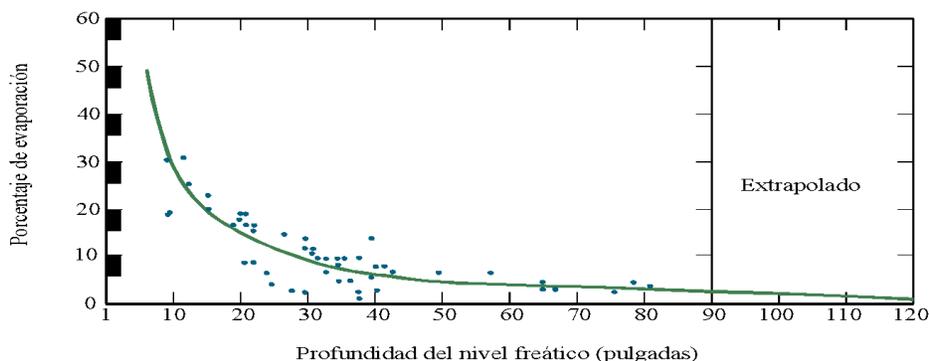


Figura 6. Evaporación del agua subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático según White.

En la tabla 5, se muestran los porcentajes respecto al volumen evapotranspiración, para las profundidades de 100, 200 y 300 cm. De acuerdo a lo anterior, se estima que el valor de la evapotranspiración promedio anual para el 2010 es de **0.7 hm³**.

Tabla 5. Volumen de evapotranspiración respecto al porcentaje estimado

PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	% DE EVAPORACIÓN (ESTIMADO GRAFICA DE WHITE)	EVAPORACIÓN (mm/año)	ÁREA (Km ²)	VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm ³)
100	6.25%	1,749	4.63	0.51
200	3.75%	1,749	2.75	0.18
300	0.92%	1,749	2.33	0.04
TOTAL				0.73

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **1.8 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero.

Por lo tanto, para fines del balance $\Delta V(S) = 0$

Solución de la ecuación de balance

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

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 0.1 + 1.8 + 0.7 - 0.6 - 0.0$$

$$R_v = 2.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h = 2.0 + 0.6$$

$$R = 2.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales.}$$

9 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **2.6 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que 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 el caso del acuífero se considera que el valor de la descarga natural comprometida, 0.1 hm³ corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y 0.7 hm³ a la evaporación que debe comprometerse para preservar el ecosistema costero.

Por lo tanto, **DNC = 1,753,401 hm³ anuales**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **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 aguas subterráneas (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 2.6 - 0.8 - 1.753401 \\ \text{DMA} &= 0.046599 \text{ hm}^3 \text{ anuales.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **46,599 m³ anuales**.

10 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico de los acuíferos Cabo Pulmo, Cabo San Lucas, Mezquital Seco, La Purísima, Santa Águeda y Santa Rosalía, B.C.S. Elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral S.A. de C.V.