CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO SAN BARTOLO (0321), 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 6
3.1 Provincia fisiográfica 6
3.2 Clima 6
3.3 Hidrografía 7
3.4 Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 9
4.1 Estratigrafía 9
4.2 Geología Estructural 11
4.3 Geología del subsuelo 12
5. HIDROGEOLOGÍA 13
5.1 Tipo de acuífero 13
5.2 Parámetros hidráulicos 13
5.3 Piezometría 14
5.4 Comportamiento hidráulico 14
5.4.1 Profundidad al nivel estático 14
5.4.2 Elevación del nivel estático 14
5.4.3 Evolución del nivel estático 14
5.5 Hidrogeoquímica 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 por flujo subterráneo horizontal (Eh) 19
7.2 Salidas 20
7.2.1 Bombeo (B) 20
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 20
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm) 21
7.2.4 Evapotranspiración (ETR) 21
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 23
8. DISPONIBILIDAD 23
8.1 Recarga total media anual (R) 24
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 24
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA) 25
9. BIBLIOGRAFÍA 26

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 San Bartolo, definido con la clave 0321 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sur-suroriental del Estado de Baja California Sur, entre los paralelos 23°35' y 24°04' de latitud norte y los meridianos 109°41' a 110°00' de longitud oeste cubriendo una superficie de 680 km^2. Colinda al oeste-noroeste con el acuífero Los Planes, al oeste con el acuífero Cañada Honda, y al sur con el acuífero Santiago, todos ellos pertenecientes al estado de Baja California Sur.

Al este su límite es el Golfo de California (figura 1). Geopolíticamente se encuentra ubicado totalmente dentro del municipio de La Paz.

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 0321 SAN BARTOLO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	109	50	10.9	23	36	16.5	
2	109	51	6.3	23	35	2.4	
3	109	53	3.2	23	36	39.3	
4	109	57	19.2	23	36	4.0	
5	109	59	49.5	23	39	54.8	
6	109	56	56.4	23	41	57.3	
7	109	57	3.7	23	43	5.1	
8	109	56	5.9	23	43	39.7	
9	109	55	48.2	23	45	33.4	
10	109	50	47.6	23	47	17.0	
11	109	52	10.9	23	49	14.4	
12	109	51	17.1	23	50	35.5	
13	109	51	43.2	23	56	7.5	
14	109	51	41.0	23	58	58.0	
15	109	53	26.7	24	0	16.4	
16	109	53	51.3	24	2	10.4	DEL 16 AL 17 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
17	109	41	41.7	23	40	56.2	
18	109	46	35.8	23	37	35.6	
1	109	50	10.9	23	36	16.5	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero San Bartolo pertenece al Organismo de Cuenca "Península de Baja California", y es jurisdicción territorial Dirección Local Baja California Sur. Su territorio completo 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 permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El usuario principal es el pecuario-doméstico. En su territorio existe la Unidad de Riego San Bartolo que tiene un título de concesión por 440,000 m^3 anuales. No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación. Únicamente se cuenta con información geológica y estratigráfica a nivel regional de las cartas geológico-mineras editadas por el Consejo de Recursos Minerales (hoy Servicio Geológico Mexicano), así como algunos estudios geohidrológicos en acuíferos vecinos Cañada Honda y Los Planes. Entre los más recientes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN JUAN DE LOS PLANES, B.C.S. REALIZADO POR LA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 1997.

Mediante actividades de campo que incluyeron la caracterización hidráulica mediante la interpretación de pruebas de bombeo, por los métodos convencionales y alternativo de Rathod y Rushton, la actualización del censo de pozos, la hidrometría de las extracciones, piezometría regional y elaboración de las configuraciones del nivel estático, se recopiló información hidrogeológica que permitió mejorar el conocimiento de la geología estructural y del subsuelo para construcción del modelo de simulación. A través del modelo se realizó la predicción del comportamiento de los niveles hasta el año 2010, antes diferentes escenarios de explotación.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA SALOBRE PARA SU DESALACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE: MIGRIÑO, PLUTARCO ELÍAS CALLES, EL PESCADERO, TODOS SANTOS Y CAÑADA HONDA, B.C. S., **elaborado por la empresa Lesser y Asociados, S.A. de C.V. en 2007**. El objetivo principal de este estudio fue determinar el conocimiento del funcionamiento hidrodinámico de estos acuíferos. Las actividades de campo incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría, nivelación de brocales, ejecución de pruebas de bombeo y obtención de muestras de agua subterránea para su análisis físico químico.

Con la información aportada por estas actividades, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para determinar la recarga total media anual y, a partir de ella, determinar su disponibilidad correspondiente.

DIAGNÓSTICO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DEL ARROYO SAN BARTOLO, 2002, realizado por la Dirección Local de la CONAGUA. Consistió en el censo de las tomas de agua del arroyo San Bartolo el cual es alimentado por las descargas naturales de manantiales.

El agua se destina al cultivo agrícola, principalmente de huertos familiares, a través de tres tomas directas. Los resultados de los aforos concluyeron que la toma ubicada en el ojo de agua tiene un gasto de 145 l/s, la toma del arroyo San Bartolo de 212 l/s y canal de la margen izquierda de la presa un gasto de 69 l/s.

CENSO DE APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS EN EL ACUÍFERO SAN BARTOLO, B.C.S. Realizado por la Subdirección de Asistencia Técnica Operativa, Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en Baja California Sur en el año 2010 con la finalidad de medir la profundidad de los niveles estáticos en los pozos existentes y obtener muestras de agua subterránea para determinar la conductividad eléctrica y la salinidad.

Sus resultados indican que las concentraciones de STD del agua subterránea sobrepasan los valores permitidos para el agua destinada al consumo humano en algunas localidades ubicadas sobre la franja costera; en tanto que en las porciones media y alta de la cuenca el agua es de buena calidad.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas del INEGI, el acuífero San Bartolo, se encuentra ubicado dentro de la Provincia Península de Baja California, Subprovincia Discontinuidad del Cabo la cual se extiende al sur del Trópico de Cáncer y es representa la parte final de la provincia.

Ocupa una extensión de 7,613 km^2. Se caracteriza por la presencia de sierras altas con elevaciones máximas que sobrepasan los 2000 msnm y está conformada por rocas ígneas intrusivas que forman montañas con pendientes fuertes y escarpadas cuyas crestas están orientadas en dirección norte-sur, desde el costado oriental de la Bahía de La Paz hasta cerca de Cabo San Lucas. Dentro de este conjunto montañoso existen dos áreas de poca pendiente: los valles de Los Planes y Santiago.

En las partes bajas se desarrolla matorral sarcocaule; en la parte media se desarrolla selva baja caducifolia y por arriba de los 1,000 msnm se encuentra bosque de encino, de encino-pino y de pino-encino.

3.2 Clima

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones climatológicas Los Planes con periodo de análisis de 1978-2008, Agua de San Antonio con periodo de análisis de 1998-2008, San Bartolo con datos de 1978-2006 y Las Palmas con periodo de análisis de 1978-2008, las cuales cubren parte de la área que comprende el acuífero San Bartolo; con apoyo en la carta de climas de Köppen, modificada por E. García para las condiciones de nuestro país adaptada a la

Región Hidrológica 6, se establece que en la zona prevalece una variedad del grupo de climas desértico cálido BW(h´), seco semicálido BSohw(w) y templado subhúmedos C(wo).

El clima predominante en la parte topográficamente baja del acuífero y sobre la línea de costa el clima se caracteriza por ser BW (h´) hw (x´) (e´) cálido seco con sus variantes, en la zona de los flancos de las sierras y en la porción central del acuífero el clima es de tipo BSohw(w) seco semicálido y BS1hw semiseco semicálido; en las regiones más altas de la sierras el clima vuelve a cambiar hasta ser C(wo) que pertenece a la gama de climas templados, subhúmedos con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 21.8°C, la máxima de 45.5°C, registrada en junio y la mínima de -2°C en enero y febrero.

En cuanto a la precipitación, varía entre 162.5 a 557.5 mm anuales. El promedio anual entre las cuatro estaciones es de 324 mm anuales con precipitaciones máximas extremas de 833 mm en septiembre. La temporada de lluvias se presenta durante el verano y el invierno en forma de intervalos, de septiembre a diciembre. El valor de la evaporación potencial media es de aproximadamente de 2,010 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 6, Baja California Sureste (La Paz). Forma parte de la cuenca “La Paz-Cabo San Lucas”, que incluye a los acuíferos de toda la porción suroeste de BCS, desde Las Pocitas-San Hilario hasta Migriño hasta llegar a Cabo San Lucas.

La región se caracteriza por presentar régimen de lluvias en verano con valores altos de precipitación en la zona serrana. Ocasionalmente la región se ve alterada debido a la presencia de fenómenos ciclónicos. En ambos casos, los escurrimientos superficiales son de tipo intermitente que generalmente desaparecen por infiltración hacia la planicie costera.

Existen numerosos arroyos que descienden de la sierra y se pierden en la planicie, como son: Arroyo San Bartolo, Buenos Aires, El Pescadero, del Aguaje Blanco y Boca del Álamo. También existen arroyos de poca importancia los cuales son tributarios de los arroyos principales como lo son: arroyo San Antonio, El Difuntito, de La Higuera, Las Auroras, La Línea, Las Casitas y Piedra Gorda.

No existen estaciones hidrométricas, ni infraestructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales.

En general el patrón de drenaje en el área de estudio presenta variaciones relacionadas con la litología y la topográfica; predominan los patrones paralelo y dendrítico.

3.4 Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en el área están representados por sierras, bajadas con lomeríos, lomeríos y un valle.

Las sierras se manifiestan como elevaciones altas en la mayor parte del área que cubre la poligonal del acuífero, principalmente en la zona oeste, norte y sur, formando localmente la Sierra Carrizalito, La Pintada, La Victoria, La Soledad y La Salecita, las cuales a su vez conforman la Sierra La Laguna, conformada por rocas ígneas intrusivas, predominantemente granodioritas y tonalitas. Las elevaciones en el límite sur sobrepasan los 1700 msnm, con pendientes abruptas y pronunciadas de donde nacen una serie de arroyos que drenan sus aguas hacia el Golfo de California, entre los que destacan San Bartolo, San Antonio, Los Tesitos, Santo Domingo, Buenos Aires y Boca del Álamo.

Las Bajadas con lomeríos se encuentran expuestas en la porción este del acuífero desde Punta Pescadero hasta Boca del Álamo, están compuestas por rocas sedimentarias, principalmente areniscas y conglomerados, las cuales por efectos erosivos tienden a redondearse formando lomeríos debido a que su bajo grado de compactación; por ello presentan menor competencia ante los agentes erosivos. El drenaje es dendrítico y paralelo con cauces poco profundos debido a su menor pendiente.

En el extremo sureste del área se presentan lomeríos tendidos con bajadas sobre rocas sedimentarias en las zonas de las márgenes de los arroyos San Bartolo y Buenos Aires, debido a su bajo grado de compactación y por lo tanto menor competencia ante los agentes erosivos.

El valle se origina por la acumulación de materiales aluviales y fluviales cuaternarios provenientes de la erosión de las partes altas, los cuales fueron depositados en esta zona por presentar una topografía más suave que en la sierra.

A través de este valle se encuentran una serie de arroyos tributarios que alimentan al arroyo principal San Bartolo.

4. GEOLOGÍA

La columna geológica de la zona de estudio, está constituida por rocas ígneas intrusivas, metamórficas, sedimentarias cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Mesozoico (Jurásico) al Cenozoico (Cuaternario).

La distribución de las diferentes unidades litológicas se presenta en la figura 2.

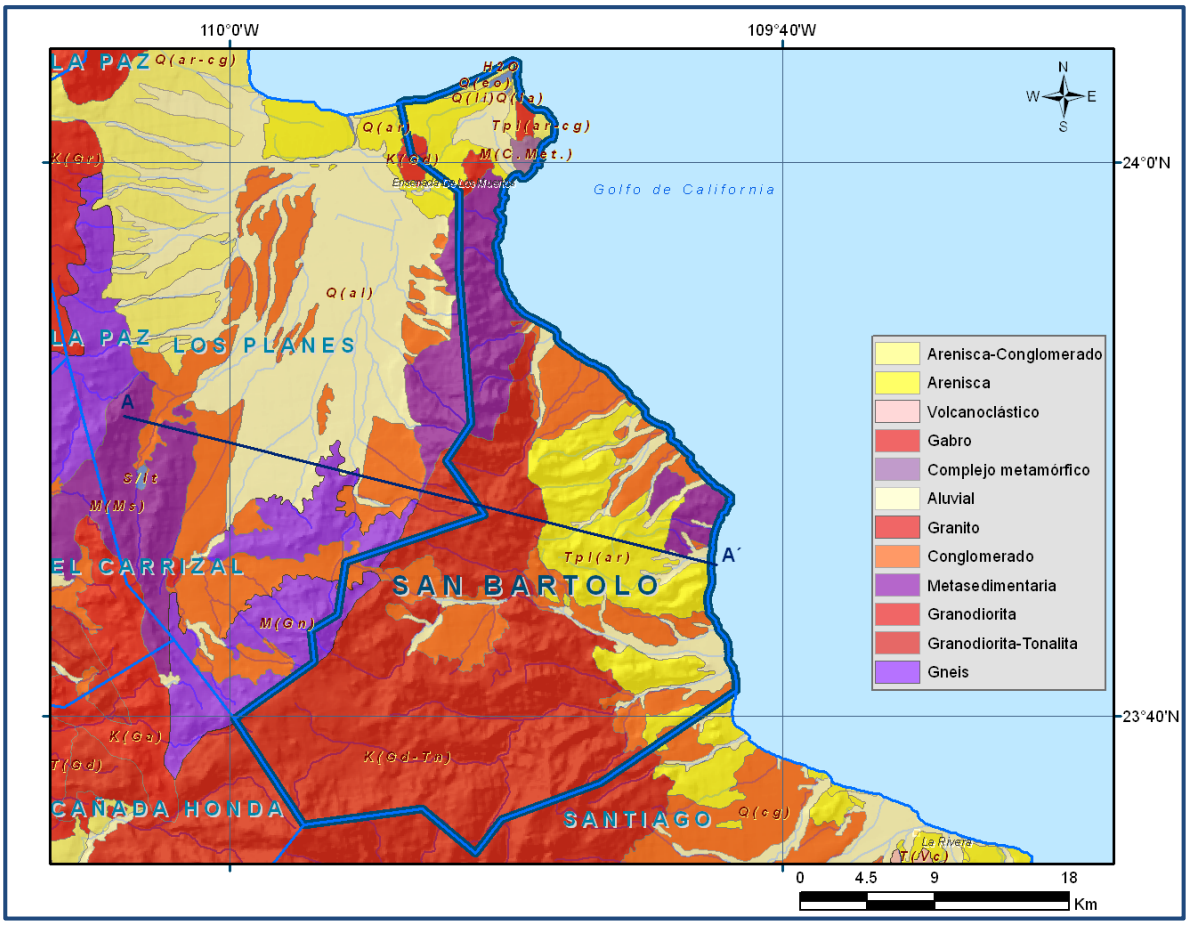


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

De acuerdo con la identificación de las unidades litológicas que afloran en la región, a continuación, se presenta la descripción de las distintas unidades cronoestratigráficas:

Rocas Metamórficas (Jurásico)

Esta unidad corresponde a metasedimentos (rocas sedimentarias metamorfizadas) de posible edad Jurásico Superior que afloran principalmente en la parte norte de la Sierra El Carrizalito, ubicada al norte del acuífero, donde constituyen la mayor parte de las elevaciones topográficas; en menor proporción se presentan en la parte sur de Punta Pescadero. Se trata de lutitas, areniscas y en menor grado margas y calizas impuras (Perez-Briceño, 2009), que fueron afectadas por metamorfismo regional de alta temperatura y baja presión ya que en algunas localidades muestran evidencias de anatexis parcial.

Rocas Ígneas (Jurásico-Cretácico)

El área de exposición de estas rocas es la más grande dentro del acuífero, ya que se encuentran expuestas en la región de sierras localizadas en las porciones norte, sur y oeste del acuífero, cubriendo la parte sur de la Sierra El Carrizalito, la Sierra Pintada, La Victoria, La Soledad y La Salecita. Son rocas intrusivas, granodioritas y tonalitas, de estructura compacta que presentan colores claros, generalmente de tono blanquecino y gris de textura fanerítica de grano medio.

Rocas Sedimentarias (Plioceno)

Las rocas sedimentarias presentes en la zona están constituidas por la Formación Los Barriles y El Chorro.

Formación Los Barriles.

Está formación está constituida por areniscas de grano medio a grueso, conglomerados polimícticos semiconsolidados mal clasificados, que varían de gravas a cantos, los cuales son más abundantes hacia la base, así como horizontes de limolitas. Aflora desde la localidad Las Tinas hasta arroyo Aguaje Blanco y sobre los márgenes del arroyo Buenos Aires. Martínez-Gutiérrez (1997) definió el espesor de esta unidad en 1650 m, en la sección tipo ubicada en el poblado de Los Barriles.

Formación El Chorro

Sobreyaciendo a los depósitos de la Formación Los Barriles se encuentran depositados concordantemente los materiales correspondientes de la Formación El Chorro, que conste de conglomerados polimícticos de fragmentos de granitos y granodioritas semicompactos, mal clasificados, en una matriz areno-arcillosa.

Depósitos Cuaternarios

A finales del Plioceno y durante el Pleistoceno se depositaron sedimentos que conforman terrazas continentales, constituidos por conglomerados polimícticos, semiconsolidados a consolidados. El Holoceno está representado por arenas, conglomerados polimícticos mal clasificados, cantos rodados, arenas, limos y depósitos de aluvión, localizados sobre las márgenes y los cauces de los arroyos, así como depósitos eólicos y litorales distribuidos en la zona costera.

4.2 Geología Estructural

La tectónica del Golfo de California es muy compleja debido al hecho de estar ubicada 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 el área.

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), que 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.

Las fallas de carácter regional se encuentran en parte enmascaradas por la presencia de abanicos aluviales recientes, sin embargo, destacan tres estructuras regionales: La fosa tectónica de San Juan de Los Planes, la cuenca sedimentaria El Cardonal y el pilar tectónico Sierra El Carrizalito de forma alargada considerada como la vertiente del extremo norte del llamado Bloque Los Cabos, el cual termina en el Golfo de California.

Se asocia un primer sistema de fallamiento normal considerado el más antiguo con orientación NE-SW, este fallamiento a su vez es desplazado por un sistema de fallas normales con rumbo NW-SE con inclinación al NE y SW dando origen a una secuencia de bloques escalonados, así como por fosas y pilares tectónicos.

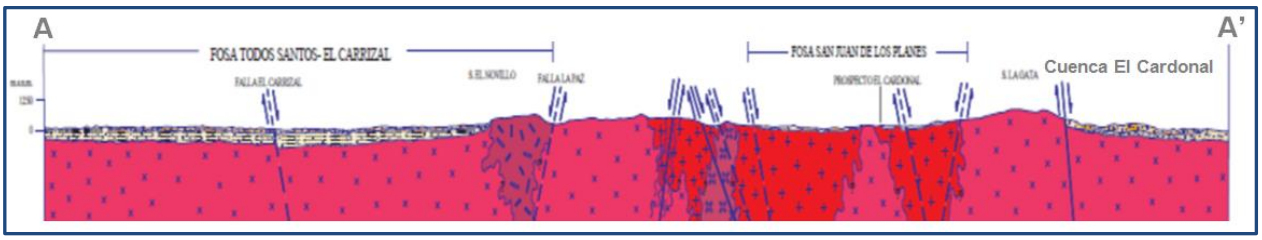
En la margen noreste del acuífero y al oriente de la Sierra El Carrizalito, se encuentra el evento regional conocido como la cuenca sedimentaria El Cardonal, la cual es una continuación estructural regional de la cuenca sedimentaria del graben de Santiago y cuya génesis está relacionada con el fallamiento normal y lístrico de rumbo N-S a NE-SW.

Las estructuras se comportan como un pilar tectónico originado por los sistemas de fallas orientados N-S, además existen estructuras curvilíneas sobre las zonas de deformación cataclástica.

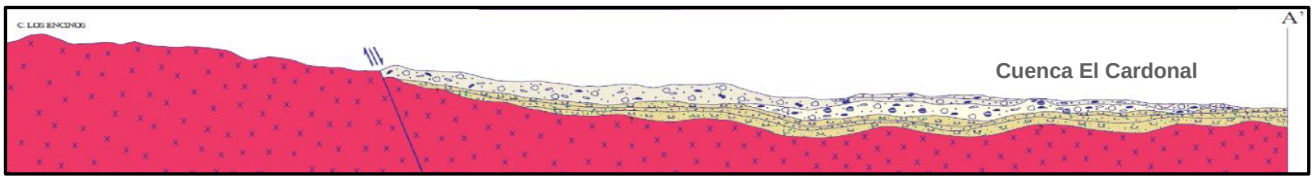
4.3 Geología del subsuelo

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 conglomerados y conglomerados arenosos de la Formación Los Barriles y El Chorro además de sedimentos aluviales y fluviales provenientes de la erosión de las partes altas de la Sierra El Carrizalito, Las Palmillas y La Soledad, que han sido transportados por abanicos aluviales y escurrimientos superficiales para ser depositados en los cauces de los arroyos y en la planicie costera. Su espesor varía desde algunos metros hasta paquetes de varios cientos de metros.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento están constituidas por las rocas ígneas intrusivas (granitos y granodioritas) y metamórficas. Las rocas graníticas eventualmente contienen fracturas y presentan alteración, generando la presencia de algunos manantiales, como los que existen en el arroyo San Bartolo y en algunos tributarios en las partes altas de las sierras. En la figura 3 se muestra unas secciones geológicas esquemáticas típicas de la región suroccidental de Baja California Sur, que corresponde a la región del valle de La Paz a la cuenca El Cardonal (escala 1:250,000) y de la cuenca El Cardonal (escala 1:50,000) respectivamente, en la que se observa el acuífero que actualmente se explota se encuentra sobreyaciendo a rocas ígneas intrusivas.



Fuente: Carta Geológico-Minera G-12-2-3-5-6 San José del Cabo, escala 1:250,000, SGM (2002).



Fuente: Carta Geológico-Minera F12-B14, San Juan de los Planes, escala 1:50,000, SGM (2000).
Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica y piezométrica, es posible identificar que el acuífero es de **tipo libre** y está constituido por sedimentos aluviales y fluviales depositados tanto en los subálveos de los arroyos San Bartolo, El Cardonal y Boca del Álamo. Algunos aprovechamientos han alcanzado las facies permeables de las formaciones Los Barriles y El Chorro. La distribución y composición de estos sedimentos es variada y presenta espesores diferentes. La permeabilidad del acuífero es alta.

La recarga que recibe el acuífero procede de la infiltración directa de la lluvia, así como por la infiltración del agua superficial que escurre a través del Arroyo San Bartolo y por los escurrimientos intermitentes durante la época de lluvias. La descarga se produce de manera natural por la descarga de manantiales, por flujo subterráneo hacia el mar, por evapotranspiración en zonas que presentan niveles freáticos someros y a través de pozos.

5.2 Parámetros hidráulicos

En la superficie que cubre el acuífero no se han realizado pruebas de bombeo para determinar sus características hidráulicas. Sin embargo, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Los Planes, Migriño, Cañada Honda, El Pescadero, Plutarco Elías Calles con características litológicas y evolución geológica similar, es posible adoptar valores característicos de transmisividad.

De esta manera, los valores promedio de transmisividad, adaptados a la geología y espesor saturado, pueden variar entre **0.5 x10^{-3} a 3 x10^{-3} m^2/s**, aunque hacia los cauces de los arroyos se pueden incrementar debido a la mayor granulometría de los depósitos.

5.3 Piezometría

Con respecto a la información piezométrica, sólo se dispone de la información piezométrica recabada en marzo de 2010, por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en Baja California Sur.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010 (figura 4), se puede observar que los valores varían de 1.5 a 16 metros. La zona de menor profundidad al nivel del agua se registra en el pozo de agua potable que abastece la localidad de San Bartolo sobre el cauce del arroyo del mismo nombre, mientras que los valores de mayor profundidad se localizan en los predios Las Tinas y El Imposible, ubicados sobre la franja costera entre Los Barriles y Punta Pescadero.

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 mostrada en la figura 5, se observa claramente el reflejo de la topografía, con los valores más bajos hacia la zona costera los cuales se incrementan gradualmente conforme se asciende topográficamente, mostrando de esta manera que la dirección preferencial del flujo subterráneo es hacia el Este, para descargar en el mar, en sentido paralelo a la dirección del escurrimiento de los arroyos.

Esto es una evidencia de que el flujo subterráneo no ha sufrido modificaciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo. En general los valores varían de pocos menos de 1 msnm a hasta elevaciones que sobrepasan los 600 msnm.

5.4.3 Evolución del nivel estático

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

Las escasas mediciones piezométricas recabadas 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 los niveles del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

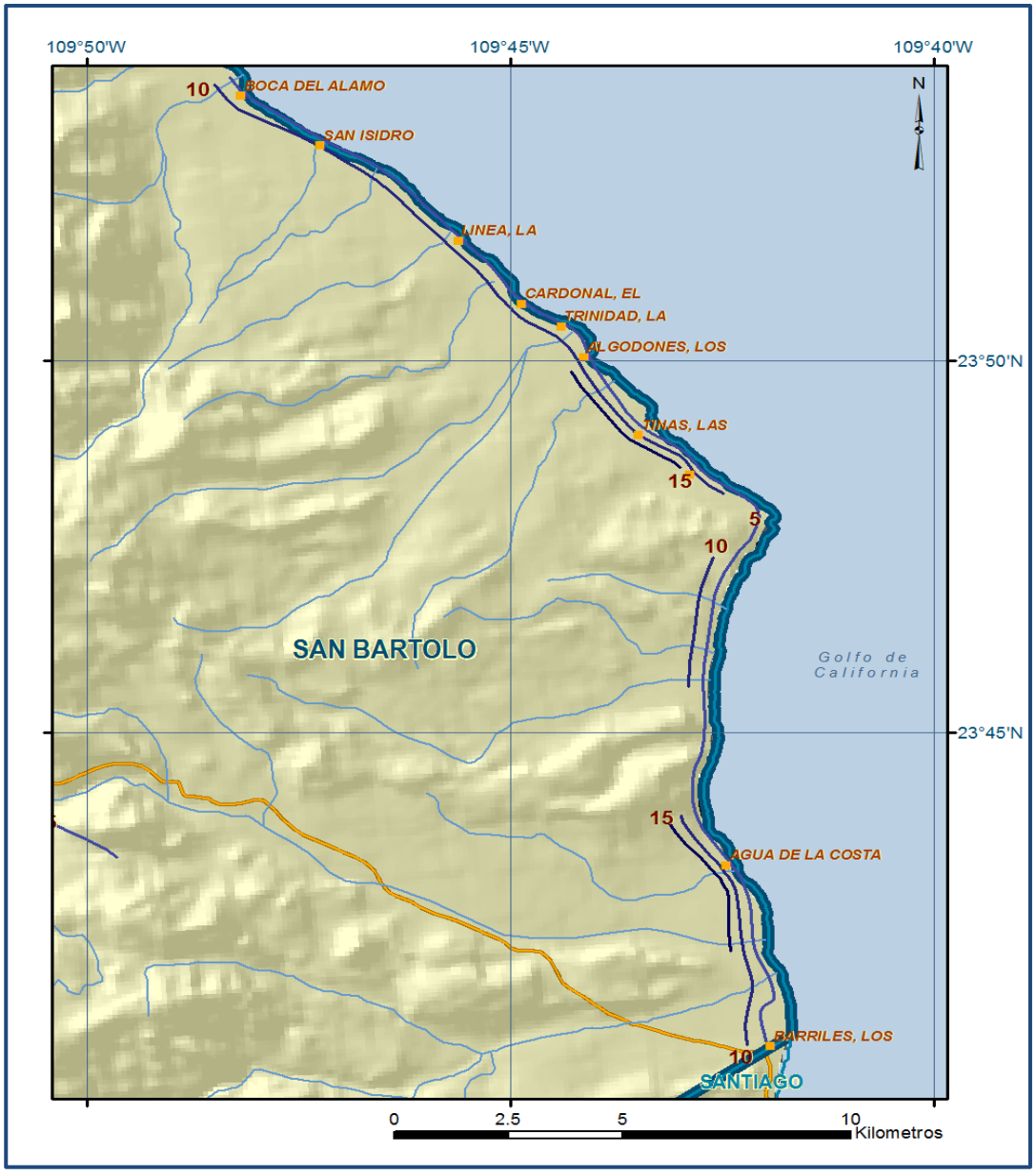


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

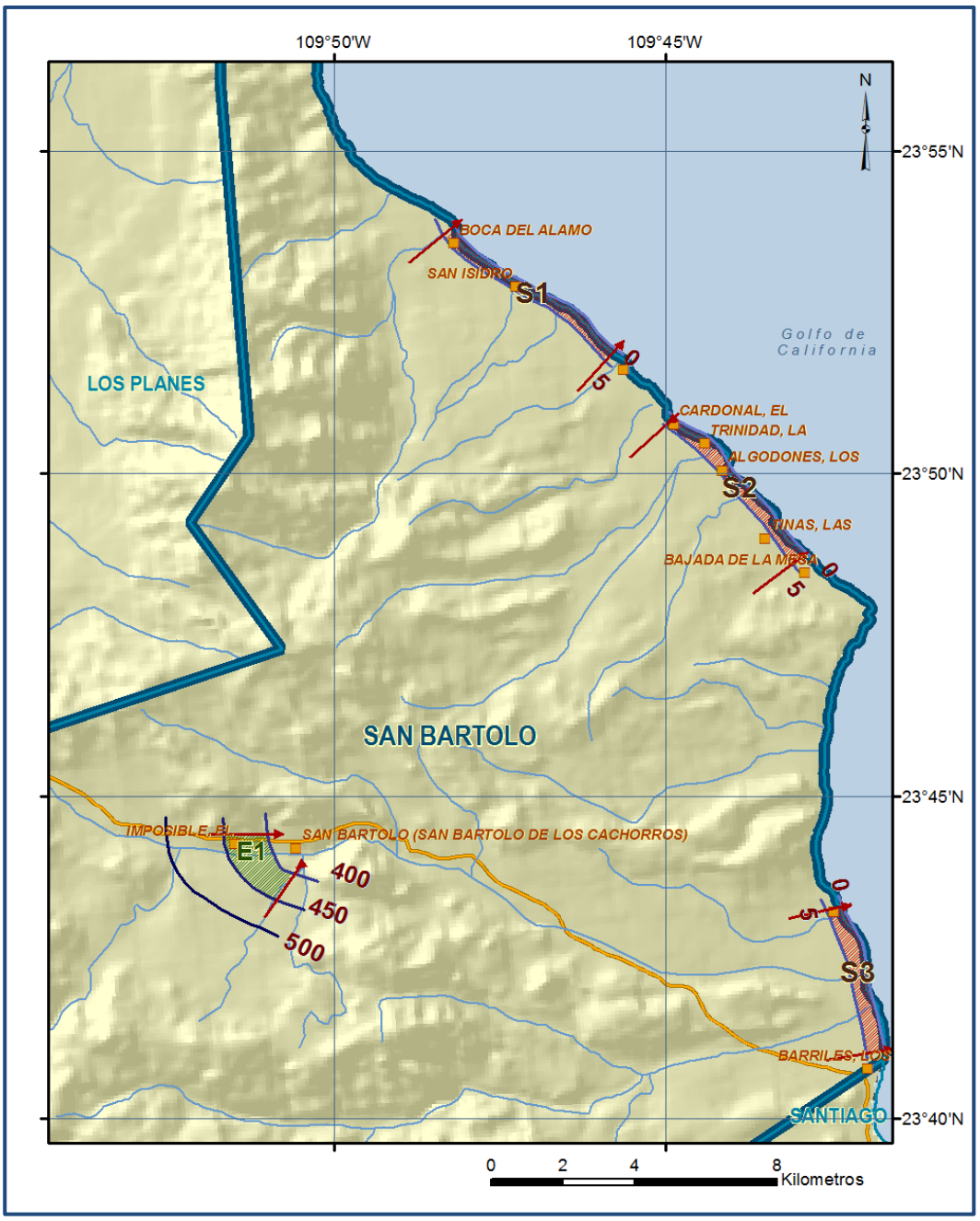


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En el área que cubre el acuífero no existen antecedentes de muestreos de agua subterránea para su análisis químico, la única información que se tiene es la realizada en este año 2010 por la Dirección Local de la CONAGUA en Baja California Sur. Como parte de los trabajos de campo realizados en el presente año, se tomaron 27 muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las mediciones hechas en laboratorio incluyeron; conductividad eléctrica, pH, dureza total, alcalinidad y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) para la mayoría de las muestras están dentro del margen permisible 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, ya que no sobrepasan el valor máximo permisible de 1,000 mg/lt.

Por otra parte, los valores de conductividad eléctrica del agua en las porciones alta y media de la cuenca del agua varían 383 µmhos/cm, en el manantial de San Bartolo, hasta 988 µmhos/cm en el predio La Esperanza; mientras que en la zona costera los valores oscilan entre 457 µmhos/cm en San Isidro a 1,582 µmhos/cm en Ensenada de Las Palmas, con excepción de las localidades de Las Tinas y Punta Pescadero donde los valores sobrepasan los 4,600 µmhos/cm.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en Baja California Sur en el 2010, se registraron un total de 56 aprovechamientos, de los cuales 47 están activos y los 9 restantes inactivos. Los aprovechamientos activos se destinan principalmente para uso pecuario y doméstico.

En conjunto el volumen de extracción asciende a **0.6 hm^3 anuales**, de los cuales 0.2 hm^3 (33.3%) se destinan al uso pecuario-doméstico, 0.15 hm^3 (25%) para uso público-urbano, 0.15 hm^3 (25%) de servicios y comercial y los 0.1 hm^3 restantes (16.7%) para uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010, en una superficie de 274 km^2 en la que están dispersos 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:

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 del acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en los sedimentos arenosos y conglomeráticos de las formaciones que lo constituyen y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

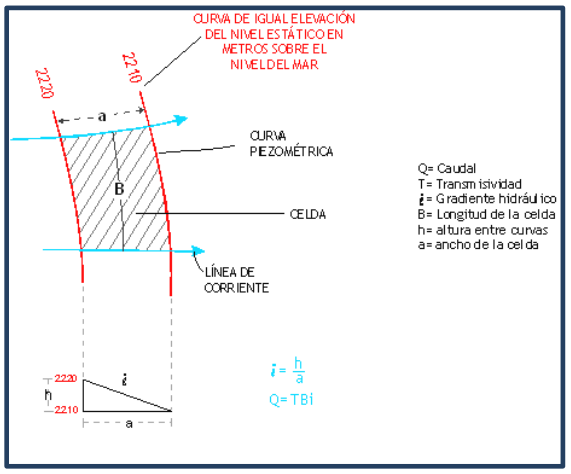
7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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.

Este término es uno de los que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rv + Eh - B - Sh - Dm - ETR = \pm \Delta V(S) \qquad (1)$$

Donde:
Rv= Recarga vertical;
Eh= Entradas subterráneas por flujo horizontal;
B= Bombeo;
Sh= Salidas subterráneas por flujo horizontal;
Dm= Descarga de manantiales;
ETR= Evapotranspiración;
ΔV(S)= Cambio de almacenamiento;



De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La recarga del acuífero tiene su origen por la precipitación sobre las zonas topográficamente más altas del área y por la infiltración de los escurrimientos superficiales. El agua se infiltra a través de las rocas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan las zonas de explotación. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:
Q= gasto;
T= transmisividad;
B= largo de la celda;
i= gradiente hidráulico

Con base en la configuración de elevación del nivel estático para 2010 (figura 5) se seleccionaron las celdas de entrada de flujo subterráneo de acuerdo a la geología. El caudal de entrada por flujo subterráneo horizontal calculado para este año se muestra en la tabla 2. La entrada subterránea promedio anual es igual a **8.5 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

Canal	Largo (B) (m)	Ancho (a) (m)	h2 - h1 (m)	Gradiente Hidráulico i	T (m^2/s)	Caudal Q= (m^3/s)	Volúmen (hm^3/año)
E1	1840	1030	50	0.048544	0.003	0.267961	8.5
					Total de entradas =		**8.5**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh) presentes en su margen este hacia el Golfo de California, por descarga de flujo superficial a través de manantiales (Dm), a través de evapotranspiración directa en las zonas de niveles freáticos someros (ETR) y de manera artificial por bombeo (B).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.6 hm^3 anuales.**

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de las configuraciones de elevación del NE del año 2010 mostrada en la figura 5.

Las celdas de salidas se localizaron en dos zonas en la parte más baja del área de explotación, sobre la franja costera. Una ubicada en “Boca del Álamo”, otra en la desembocadura del arroyo El Cardonal y la tercera en la desembocadura del arroyo San Bartolo. El valor estimado para cada celda se muestra en la tabla 3. El valor promedio anual de las salidas subterráneas es igual a **6.8 hm^3/año.**

Tabla 3. Salidas por flujo subterráneo para el año 2010.

Canal	Largo (B) (m)	Ancho (a) (m)	h2 - h1 (m)	Gradiente Hidráulico i (m)	T (m^2/s)	Caudal Q = TBi (m^3/s)	Volúmen (Hm^3/año)
S1	5760	300	5	0.016667	0.001	0.096000	3.0
S2	5340	400	5	0.012500	0.001	0.066750	2.1
S3	4880	460	5	0.010870	0.001	0.053043	1.7
					Total de entradas =		**6.8**

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

Este componente corresponde a la descarga natural a través del manantial "San Bartolo" que alimenta al arroyo del mismo nombre, cuyo escurrimiento drena aguas abajo, hasta infiltrarse. El aforo se realizó en el principal ojo de agua de este manantial en marzo y julio de 2010. Para fines del balance se considera un valor conservador de descarga de 100 lps que equivalen a un volumen de **3.2 hm³** anuales.

7.2.4 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, se considera una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

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:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	21.80		
P(mm) =	324.00	P² =	104976
L =	1363.01	L² =	1857800.622
ETR (mm) =	**331.28**		

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=422.5, 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 ausencia 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 (2010 mm obtenido como promedio del valor registrado de las estaciones climatológicas ubicadas en el acuífero). 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 5 se deduce que para una profundidad al NE de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%. Considerando una superficie promedio de 3 km^2 de la porción ubicada entre el manantial San *Bartolo* y la presa ubicada aguas abajo, donde la profundidad al NE es en promedio de 1 m y un 5 % de la evaporación potencial, se tiene que la evaporación es del orden de los **0.3 hm³**

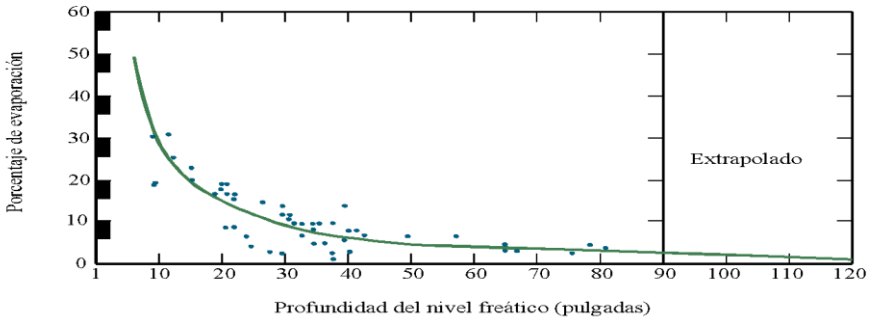


Figura 6. Evaporación del AS expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático (White)

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km^2)	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm^3/año)
2.01	**3**	**0.05**	**0.3**

En la porción costera del acuífero no existe cobertura vegetal y las profundidades al nivel del agua subterránea, registradas en las obras, superan los 5 m, por lo que no se considera presente el componente de evaporación.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica necesaria para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático. Los registros existentes solo son para 2010 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, aún 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 lo tanto, para fines del balance **ΔV(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:

$$\mathbf{Rv = B + Sh + Dm + ETR – \Delta V(S) – Eh \quad (2)}$$

$$Rv = 0.6 + 6.8 + 3.2 + 0.3 – 0.0 – 8.5$$

$$\mathbf{Rv = 2.4\ hm^3/año}$$

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

$$R = Rv + Eh$$

$$R = 2.4 + 8.5$$

$$\mathbf{R = 10.9\ hm^3\ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **10.9 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 está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero San Bartolo se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **6.9 hm³ anuales**, de los cuales 3.4 hm^3 corresponden al 50% de las salida por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interface marina, 3.2 hm^3 a la descarga del manantial de San Bartolo, comprometida como flujo base de agua superficial que debe drenar aguas abajo hacia la presa para sostener el gasto ecológico y 0.3 hm^3 a la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema ribereño del arroyo “San Bartolo”.

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 **2,212,624 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.

$$DMA = R - DNC - VEAS$$
$$DMA = 10.9 - 6.9 - 2.212624$$
$$DMA = 1.787376 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,787,376 m³ anuales.**

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación.

No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local en Baja California Sur. Diagnóstico de las aguas superficiales del arroyo San Bartolo, 2002.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local en Baja California Sur. Información Piezométrica del año 2010.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Estudio para Determinar la Factibilidad de Extracción de Agua Subterránea Salobre para su Desalación en los Acuíferos de: Migriño, Plutarco Elías Calles, El Pescadero, Todos Santos y Cañada Honda , B.C. S. Elaborado por la empresa Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

Pérez-Briceño, A., 2009, Elaboración de un modelo hidrogeológico de la cuenca San Juan de Los Planes, B.C.S. mediante un sistema de información geográfica (SIG) y un modelo digital de elevación (MDE). Tesis UABCS.