

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA PAZ (0324), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA SUR**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	1
Antecedentes.....	1
1.1. Localización.....	1
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	2
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1. Provincia fisiográfica	6
3.2. Clima.....	7
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología estructural	15
4.3. Geología del subsuelo	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1. Tipo de acuífero	17
5.2. Parámetros hidráulicos	17
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.....	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1. Entradas.....	23
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	24
7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Es)	25
7.1.4. Recarga incidental (Ri)	26
7.2. Salidas.....	27
7.2.1. Bombeo (B)	27
7.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)	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 agua subterránea (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 La Paz, definido con la clave 0324 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Baja California Sur, entre los paralelos 23°48'31" y 24°19'27" de latitud norte y entre los meridianos 110°05'09" y 110°34'00" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,404 km².

Limita al noreste con el acuífero El Coyote; al este con Los Planes; al sur con El Carrizal; al oeste con El Conejo-Los Viejos y al noroeste con el acuífero Alfredo V. Bonfil. Al norte su límite natural es el Golfo de California (figura 1). Geopolíticamente, la superficie completa del acuífero se localiza dentro del municipio La Paz.

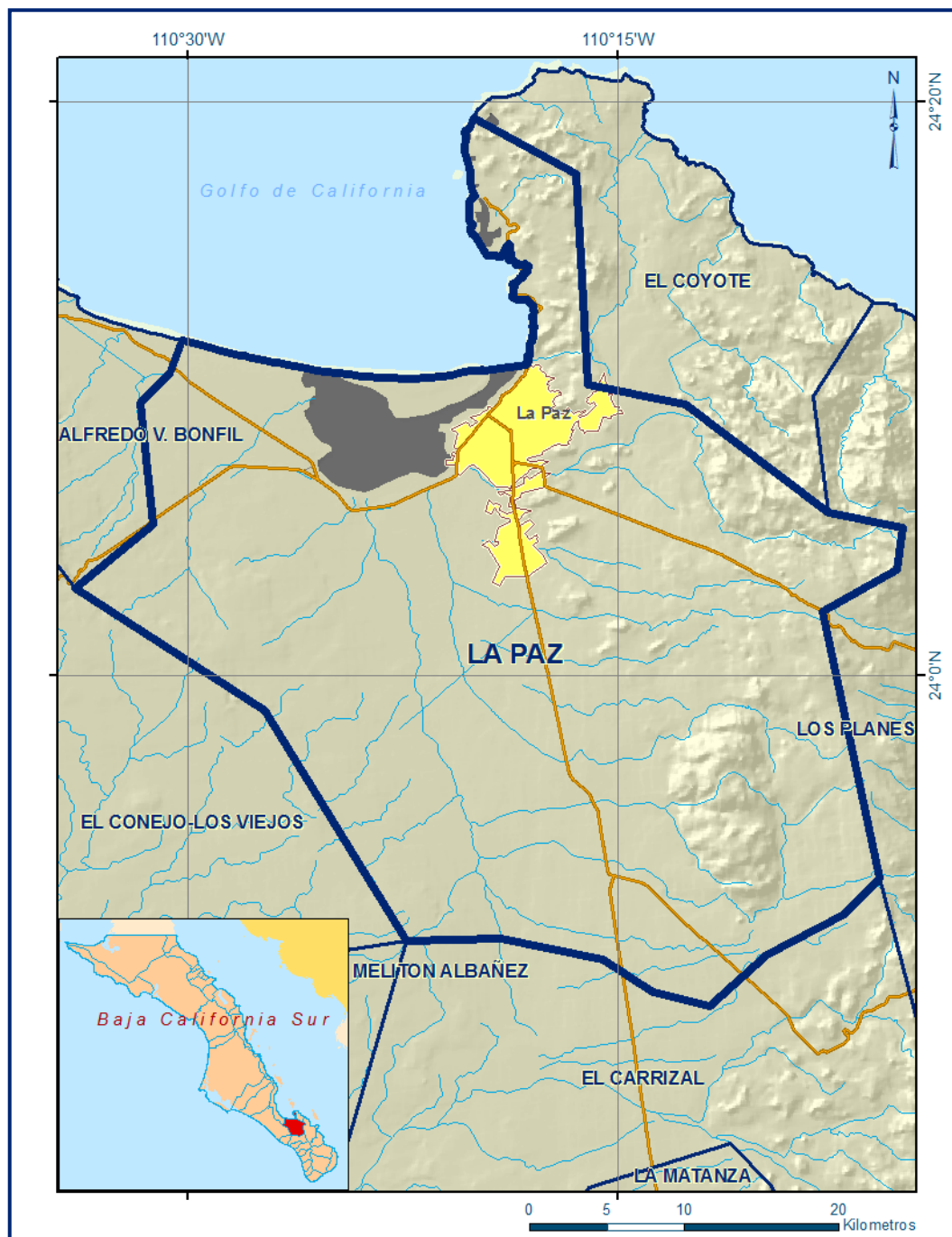


Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California, al Consejo de Cuenca Baja California Sur, instalado el 03 de marzo de 2000 y es jurisdicción de la Dirección Local en Baja California Sur. Su territorio se encuentra completamente

vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero rige en la mayor parte de su superficie y es el “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. La porción norte está sujeta 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 DOF el 2 de julio de 1954. Ambas vedas son de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUIFERO 0324 LA PAZ

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	20	2.7	24	19	26.3	
2	110	16	26.9	24	17	29.8	
3	110	16	3.4	24	10	7.8	
4	110	12	38.8	24	9	26.8	
5	110	7	40.1	24	5	41.7	
6	110	5	3.3	24	5	8.0	
7	110	5	15.1	24	3	40.9	
8	110	7	50.9	24	2	13.8	
9	110	5	53.4	23	52	57.9	
10	110	7	6.4	23	51	42.1	
11	110	9	47.7	23	50	16.1	
12	110	11	48.1	23	48	30.1	
13	110	13	46.8	23	48	57.1	
14	110	15	32.8	23	50	7.2	
15	110	19	5.9	23	50	49.5	
16	110	22	22.7	23	50	46.5	
17	110	27	19.2	23	58	46.8	
18	110	33	57.6	24	3	3.4	
19	110	31	13.2	24	5	16.7	
20	110	31	40.3	24	9	30.5	
21	110	30	38.8	24	10	30.9	
22	110	30	13.3	24	11	41.2	DEL 22 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	110	20	2.7	24	19	26.3	

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna; los usuarios se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas

Subterráneas del Acuífero La Paz-Carrizal, A.C., instalado el 7 de julio de 1998. En la porción norte de su territorio se localiza el área de Protección de Flora y Fauna “Balandra”, decretada el 30 de noviembre de 2012, y el sito RAMSAR denominado “Humedales El Mogote-Ensenada de La Paz, decretado el 02 de febrero de 2008.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo estudios geohidrológicos de evaluación. Entre los más importantes que se consultaron para la elaboración de este documento se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO COMPLEMENTARIO DE LAS CUENCAS LA PAZ-EL CARRIZAL, PARA PROPORCIONAR AGUA EN BLOQUE A LA CIUDAD DE LA PAZ, B.C.S. Realizado en 1986 por el Instituto de Geofísica de la UNAM para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El estudio presenta un panorama general de las condiciones geohidrológicas de la región, como punto de partida para estudios posteriores que tengan como objetivo principal la operatividad del sistema natural, para suministrar agua a la ciudad de La Paz. Entre sus actividades de acampo destacan el censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, hidrometría de las extracciones, ejecución de pruebas de bombeo y toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos.

ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO DE LA PAZ, B.C.S. Realizado en 2001 por Consultores en Ingeniería Geofísica S.A. de C.V. (CIGSA) para la Comisión Nacional del Agua. Recopila información hidrogeológica, realiza sondeos geofísicos toma muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos, para la construcción de un modelo que permita identificar el avance y posición de la intrusión marina.

SITUACIÓN ACTUAL Y POSIBLES ESCENARIOS DE INTRUSIÓN SALINA EN EL ACUÍFERO DE LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR Y SU APROVECHAMIENTO COMO FUENTE DE DESALACIÓN PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. Realizado en 2008 por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tiene como objetivo realizar los estudios hidrogeológicos y geofísicos que permitieran analizar los distintos escenarios para determinar la mejor ubicación y tipo de obra de toma para una planta desaladora para el abastecimiento de agua a la ciudad de La Paz, así como, evaluar el aspecto económico de cada opción de desalación, su impacto al acuífero y las opciones para la disposición de salmuera.

MANEJO INTEGRADO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO LA PAZ EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR. Realizado en 2010 por el Centro de

Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) S.C. para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue establecer las bases del manejo integrado del agua que permitieran la estabilización del acuífero, para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas y sociales que están apoyadas en los recursos hidráulicos disponibles, mediante acciones que incidan directamente en el mejoramiento del nivel de vida de la población actual y futura. Recopila e interpreta información hidrogeológica, geofísica e hidrogeoquímica para determinar la geometría y estructura del acuífero, describir el balance de aguas subterráneas y definir los factores técnicos, económicos y políticos que afectan la demanda de agua en el sector agrícola, urbano, minero e industrial; además de evaluar las consecuencias de la aplicación de recursos económicos en los programas federales relativos al manejo del agua.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO LA PAZ, B.C.S., Informe interno elaborado en 2012 por la Gerencia de Aguas Subterráneas, SGT, CONAGUA. Es un documento que forma parte de una serie de 18, elaborados para los acuíferos costeros que presentan intrusión marina, con el propósito de atender el Programa Nacional Hídrico 2007-2012, que en su Objetivo 7 establece la necesidad de evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico y en la estrategia 3 de dicho objetivo menciona que se deberá promover y apoyar la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, en materia de medidas de adaptación ante el cambio climático y específicamente la elaboración de estudios sobre vulnerabilidad, escenarios y posibles impactos y opciones de solución a la intrusión salina en acuíferos. Presenta información hidrogeológica general del acuífero que permite el análisis de los factores de vulnerabilidad a la intrusión marina, de acuerdo con una metodología de evaluación cuantitativa desarrollada por la misma Gerencia, definir las condiciones actuales y su posición. Adicionalmente, evalúa de manera conservadora el impacto económico de la intrusión marina.

PIEZOMETRÍA, HIDROMETRÍA DE LAS EXTRACCIONES Y RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS EN EL ACUÍFERO LA PAZ, 2019. Dirección Local en Baja California Sur de la Comisión Nacional del Agua. Información piezométrica histórica y actualizada, estimación de los volúmenes de extracción y resultados de análisis químicos y determinaciones in situ a muestras de agua del acuífero.

La información piezométrica de este trabajo y su actualización al año 2016, fueron la base para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, que sirvieron para actualizar el balance de aguas subterráneas.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Baja California. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1989), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, Discontinuidades Llanos de La Magdalena y Del Cabo y Subprovincia Fisiográfica Sierra La Giganta.

La Provincia Península de Baja California, ubicada en el noroeste de la República Mexicana, desde el norte del paralelo 32° hasta el sur del 23° N, donde se ubica San José del Cabo, sur del Trópico de Cáncer; se extiende a lo largo de 1,333 km, con rumbo noroeste-sureste. Abarca una pequeña extensión en territorio estadounidense, más de 80% del estado de Baja California y la totalidad del estado de Baja California Sur. El eje geológico estructural que le da la forma alargada y angosta es su Cordillera Peninsular que tiene la misma orientación que la provincia, y el núcleo granítico masivo (batolito) que la constituye, aflora en el norte y queda sepultado hacia el sur. Este eje tiene forma de un bloque de falla alargado y basculado hacia el suroeste, por lo que presenta un flanco abrupto hacia el Golfo de California y otro tendido y de mayor suavidad hacia el Océano Pacífico. La Cordillera Peninsular remata en su extremo meridional en el bloque del Cabo, donde vuelven a quedar expuestas las rocas graníticas.

La Discontinuidad Llanos de La Magdalena se sitúa en la región centro-oeste del estado de Baja California Sur, limita al norte y al oriente con la Subprovincia Sierra La Giganta; al poniente y al sur con el Océano Pacífico y al sureste con la Discontinuidad Los Cabos. Las topoformas presentes corresponden a un terreno plano con un suave declive hacia la costa en la porción central, en donde se localiza una serie de lomeríos ramificados con bajadas. También se incluye la topoforma de una llanura aluvial de piso rocoso y otra llanura aluvial que se ubican al occidente y sur de Ciudad Constitución, respectivamente. El relieve que predomina es el de llanuras con o sin dunas, constituidas de suelos del Cuaternario; sin embargo, presenta lomeríos y bajadas sobre todo en el área de contacto con la sierra. Su característica principal es la presencia de afloramientos de sedimentos terciarios marinos.

La Discontinuidad del Cabo se extiende al sur del Trópico de Cáncer y es la parte final de la provincia, que comprende una superficie de 7,612 km² que corresponde al 9.79% de la superficie estatal. Se caracteriza por un conjunto de sierras que se orientan, a diferencia de la subprovincia Sierra de La Giganta, de noroeste a suroeste, desde el costado oriental de la Bahía de La Paz hasta cerca de Cabo San Lucas. Movimientos

epirogenéticos relacionados a la apertura del golfo han permitido el desarrollo de estructuras tectónicas relativamente recientes que son las responsables de las características geomorfotectónicas del actual bloque de Los Cabos. Presenta un sistema de topoformas de Lomerío con Cañadas asociadas con laderas bajas y tendidas hacia la zona costera, con una altura que varía de 100 a 200 msnm las cuales se han conformado en las fosas tectónicas, producto de fallamiento normal.

La Sierra La Giganta se ubica en la porción oriental, es un elemento orográfico muy importante en la región que tiene como límite al Golfo de California, mientras que la región occidental limita con la discontinuidad Desierto de San Sebastián Vizcaíno, el Océano Pacífico y la discontinuidad Llanos de La Magdalena. Se extiende aproximadamente desde el límite con Baja California y termina en los alrededores de la ciudad de La Paz. Esta zona montañosa, de dirección preferencial noroeste-sureste, que se puede denominar desde el punto de vista fisiográfico como Sierra con Mesetas Alta Compleja, abarca una gran cordillera alargada con una amplia meseta. Se localiza desde los 28° hasta un poco más al sur de los 24° de latitud norte, en la costa del Golfo de California, aunque en su región más ancha llega al Océano Pacífico. Su máxima elevación corresponde al volcán Las Vírgenes con 1,920 msnm. En el occidente de esta región el relieve está constituido de mesetas basálticas con cañadas hacia el norte en tanto que en una angosta franja del oriente dominan las sierras, cuya litología es principalmente de rocas ígneas extrusivas del Terciario. Por último, en el sur el relieve es también serrano, pero se diferencia del anterior en cuanto a las rocas que lo constituyen, ya que aquí son sedimentarias y vulcanosedimentarias del Terciario Superior.

3.2. Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados por E. García (1964) para las condiciones de México, se establece que en la superficie cubierta por el acuífero predominan los climas secos y áridos (BW), con variantes de acuerdo con la elevación topográfica. En la mayor parte de la superficie se registra el clima BW(h')w muy árido, cálido, con temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Hacia las partes topográficamente más altas el clima es de tipo BWchw muy árido, semicálido; y BSchw árido, semicálido. Todas estas variantes de clima presentan temperatura media anual entre 18 y 22°C, temperatura del mes más frío menor de

18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó información de 10 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Lagunillas, Pichilingue, Aeropuerto Viejo km 5, San Pedro, Alfredo V. Bonfil, Los Filos, El Carrizal, Los Divisaderos, El Cajoncito y Los Robles; cuyo registro comprende el periodo 1980-2014. Con base en esta información, se determinó que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son **22.0 °C, 248y 2,290 mm**, respectivamente. Los valores máximos de temperatura, de 30 a 42 °C, se registran entre los meses de mayo a septiembre, en tanto que las mínimas, de 10 a 15 °C, se presentan de noviembre a enero. Con respecto a las lluvias, las máximas se registran entre los meses de junio a septiembre (de 18 a 107 mm) y las mínimas de marzo a mayo (0.2 a 3 mm).

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. De igual manera, las condiciones de aridez, causadas por las bajas precipitaciones pluviales, son agravadas por la presencia de sequías extremas que ocasionan una disminución de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento del acuífero.

3.3. Hidrografía

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica 06 “Baja California Sureste (Magdalena)”, Subregión Hidrológica “Baja California Suroeste”, cuenca “La Paz-Cabo San Lucas”, subcuencas “La Paz”, y “Arroyo Datilar”.

La cuenca La Paz tiene una superficie de 947 km² en la que las corrientes principales son los arroyos La Paz, San Pedro, Datilar y El Cajoncito, los cuales drenan hacia el Golfo de California. La escasez e irregularidad de las lluvias origina que solo en algunas ocasiones se presenten escurrimientos superficiales después de las lluvias. La mayor parte de los escurrimientos se infiltran o se evaporan a lo largo de los cauces y solamente en años de lluvias de extraordinarias o eventos ciclónicos los arroyos descargan hacia el mar. La corriente principal es el arroyo La Paz, que escurre en dirección norte y vierte sus aguas en el Golfo de California en forma torrencial. Por su margen derecha recibe la aportación de los arroyos tributarios El Salto, La Palma y

Cajoncito, que provienen de la Sierra La Victoria, los cuales en su origen tienen cauces estrechos, profundos y de fuerte pendiente, pero al llegar a la llanura se convierten en escurrimientos inestables y divagantes que tienen un arreglo trenzado. Los dos primeros arroyos confluyen al arroyo La Paz en su parte alta, mientras que el arroyo El Cajoncito llega a la llanura, cerca de la desembocadura del arroyo La Paz.

La red de drenaje de la cuenca es compleja y está asociada a la geología; se caracteriza por presentar patrones dendríticos y rectangulares en el área serrana, controlados por factores tectónicos, con cambios bruscos de pendiente, para después cambiar a una pendiente suave en su porción baja.

3.4. Geomorfología

Las zonas montañosas más importantes en la región son la Sierra La Giganta, ubicada al noroeste de la Bahía de La Paz y la Sierra La Laguna, ubicada al sur, hacia la región de Los Cabos. Localmente, existe la Sierra La Victoria, localizada entre Punta Prieta y Pichilingue, al noreste de La Paz, con rumbo hacia el Golfo de California.

En la región existen rasgos geomorfológicos que han sido originados como consecuencia de diferentes procesos geológicos que incluyen primero la formación de una montaña de origen intrusivo, después la actividad volcánica, procesos de sedimentación y finalmente la formación de una depresión transpeninsular, ocasionada como consecuencia de una falla tectónica que tiene una orientación NW-SE, en la que se depositaron los materiales de acarreo de los arroyos La Paz y Carrizal y sus arroyos tributarios más importantes. El resultado de estos procesos geológicos se manifiesta en la presencia de 3 unidades geomorfológicas: montañas de rocas ígneas y metamórficas; mesetas y lomeríos de materiales clásticos y llanura o valle aluvial.

En la unidad de montañas se agruparon las montañas intrusivas y las montañas volcánicas. Las primeras son un complejo ígneo y metamórfico que se localiza en la porción oriental, que forma parte de la Sierra La Laguna, orientada en sentido N-S. El macizo rocoso está drenado por arroyos que tiene fuerte pendiente. La porción norte está conformada por sierras redondeadas constituidas por rocas graníticas que presentan drenaje arborescente y enrejado controlado por fracturas; en tanto que la parte constituida por rocas metamórficas es de morfología más abrupta, de drenaje arborescente. Las montañas volcánicas conforman la porción norte de la Sierra La Laguna, donde recibe el nombre de Sierra la Victoria, están constituidas por emisiones de lavas y por piroclastos de composición riolítica. Aunque su máximo desarrollo se presenta hacia Punta Pichilingue, en la cuenca de La Paz sólo aparecen como cerros

aislados con laderas de fuerte pendiente, pero con cimas en forma de mesetas, cuando la parte alta está constituida por lavas, mientras que si los cerros están constituidos por piroclastos adoptan formas redondeadas. En términos generales, esta unidad de montañas intrusivas y volcánicas ocupa una superficie de 354 km² que representan el 25% del área total y en ella se produce el mayor escurrimiento hacia las zonas de relieve más suave.

Los lomeríos de materiales clásticos agrupan a la zona de lomeríos de pendiente suave y fuerte que se localiza hacia la porción occidental; están constituidos por materiales clásticos finos y gruesos alternantes (capas de limos, arenas, arcillas, gravas, areniscas y limolitas) que tienen una disposición subhorizontal y de origen volcánico y sedimentario. Conforman el límite oeste de los valles de Paz y El Carrizal como consecuencia de una falla de orientación N-S que corta transversalmente a la península, las estribaciones de la Sierra La Victoria también se presentan en forma de lomeríos de materiales clásticos.

La llanura o valle aluvial se formó como resultado del relleno de sedimentos aluviales en la depresión tectónica transpeninsular ocasionado por el Arroyo La Paz y sus tributarios más importantes. Está conformada por limos arenosos medianamente consolidados. Las llanuras aluviales se manifiestan como terrazas y como depósitos de piedemonte que presentan drenaje de tipo paralelo y trenzado. La parte baja está ocupada por el área urbana de la ciudad de La Paz y la zona agrícola, presenta un estado de madurez en su ciclo geomorfológico. En esta región los valles son sensiblemente planos y están alojados hacia la costa, formando parte del arreglo estructural de la región. Este extenso valle abarca la porción central y suroeste del acuífero con una altitud promedio de aproximadamente 50 msnm. La continuidad de los valles se ve interrumpida al oriente por las sierras Las Calabazas, La Palmillosa y La Pintada que alcanzan hasta los 900 m de altura con respecto al nivel promedio del valle.

4. GEOLOGÍA

Las unidades litológicas que afloran en esta región del sur de la Península de Baja California comprenden un registro estratigráfico del Triásico Superior Inferior al Holoceno. Las principales sierras están constituidas por rocas ígneas intrusivas y metamórficas (figura 2). El marco geológico regional se divide en dos cinturones tectonoestratigráficos (Gastil et al., 1981; Blake et al., 1984); uno de afinidad de corteza oceánica representado en las islas de la porción occidental y noroccidental y el otro de afinidad sedimentaria, vulcanosedimentaria y volcánica en la región peninsular y en las islas de la porción oriental (Carta Geológica-Minera G12-10-11 “La Paz” Esc. 1:250.000

SGM, 2002). En la superficie cubierta por el acuífero aflora el complejo metamórfico, asociado con rocas arcillosas, que fueron generadas a lo largo de la zona de la falla La Paz. Esta secuencia metamórfica consiste de pizarras, filitas, esquistos y sillimanita. Sobreyaciendo a dicha secuencia, se encuentran rocas intrusivas de composición gabroica, granítica y granodiorítica. La columna estratigráfica se encuentra coronada por un conjunto de sedimentos que son producto de la denudación de las rocas preexistentes dando origen a acumulación de material aluvial. A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente, tomando como base principal las Cartas Geológico-Mineras San Antonio F12-B13 y La Paz G12-D83, escala 1: 50,000, SGM, 1996 y 2008, respectivamente:

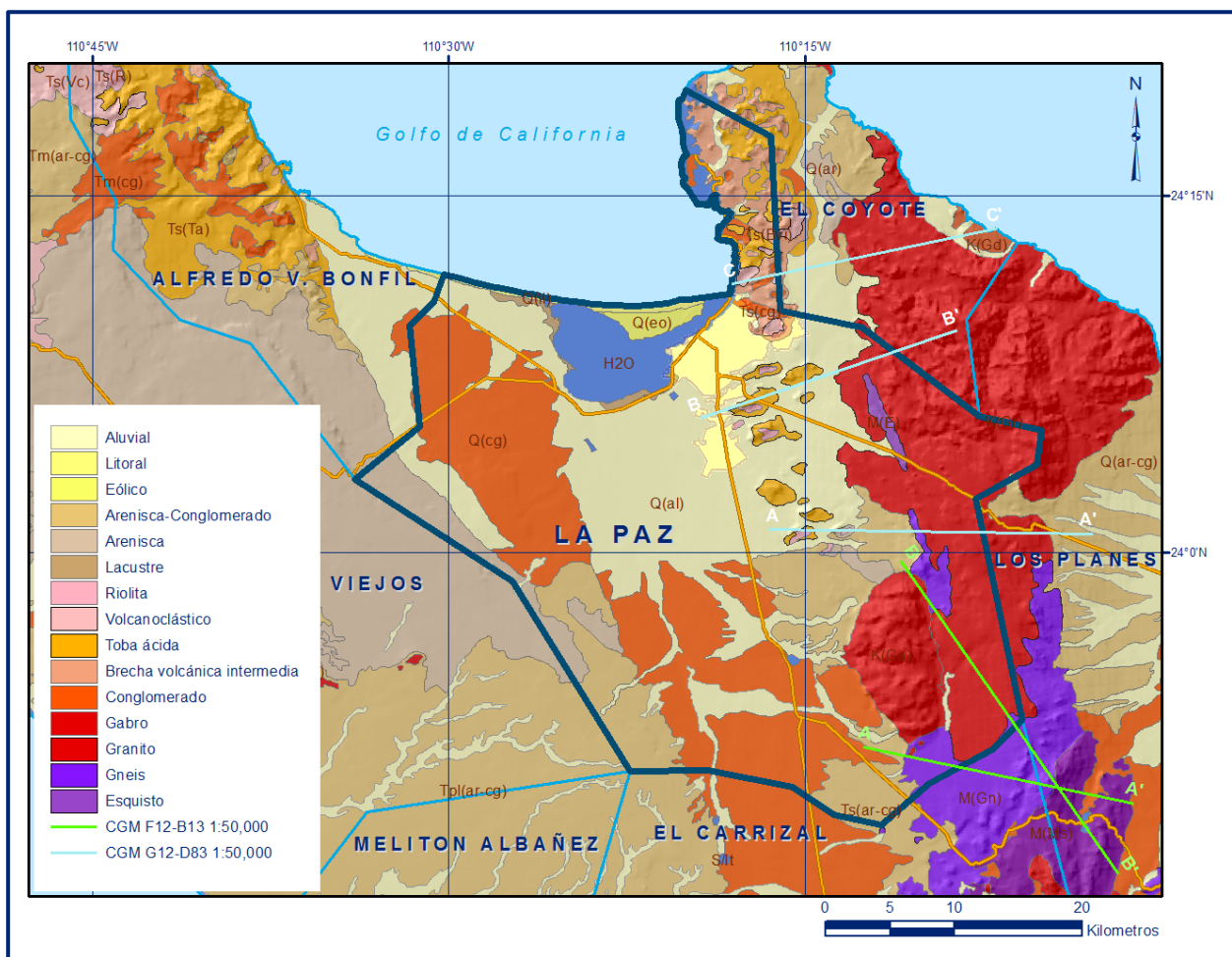


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigrafía de la región en la que se localiza el acuífero se describe a continuación en orden cronológico de la unidad más antigua a la más reciente:

TRIÁSICO SUPERIOR-JURÁSICO SUPERIOR

En el cinturón occidental las rocas más antiguas corresponden a un complejo ofiolítico, constituido por anfibolitas, metagabros, metadiabasas, rocas metavolcánicas, esquistos y gneises, que presentan metamorfismo de bajo grado correspondiente a la facies de esquistos verdes; afloran como remanentes y techos colgantes en las porciones este y sureste del acuífero. Es la unidad más antigua y corresponde a un complejo de rocas metamórficas de diferente origen que presentan superficies de esquistosidad bien definidas. La serie continúa con un grupo de rocas intrusivas, gabros y dioritas, que afloran en la porción oriental del acuífero. Federico Mina (1957) se refiere a esta secuencia de rocas metamórficas, intrusivos graníticos y extrusivas asociadas, con el nombre de Complejo Ígneo-Metamórfico, que forma el espinazo de la Península de la Baja California y que constituye el basamento cristalino sobre el que descansa toda la secuencia de rocas sedimentarias marinas. Localmente están afectadas por intrusivos, generando rocas de metamorfismo de contacto como hornfels y skarns de epidota. Los esquistos afloran al oriente del poblado El Triunfo, en una franja NE-SW, hasta la zona norte de San Antonio.

CRETÁCICO SUPERIOR

Estos cuerpos graníticos representan la actividad magmática que ocurrió durante el Cretácico Superior. En el área del acuífero se tienen unidades representadas por una tonalita y granito-granodiorita. La tonalita bordea al macizo cristalino de composición granítica, cuya textura es de grano grueso y su relación estratigráfica es cortante; aflora hacia las porciones centro, centro-sur y noreste-este del área, bordeando al macizo cristalino de composición granítica, formando los flancos de la sierra Las Cruces. El granito aflora en la porción oriental de la región, constituyendo la parte central de la sierra Las Cruces. Ambos intrusivos son cortados por diques de textura pegmatítica y aplítica de composición granítica.

TERCIARIO

Paleoceno Superior-Eoceno Superior

Formación Tepetate

Fue descrita por Heim Arnold (1922), sobre el arroyo Colorado, ubicado en las inmediaciones del Rancho El Tepetate, asignándole una edad Paleoceno Superior-Eoceno Superior Temprano, sin que existan trabajos recientes que la describan con mayor grado de detalle. La parte basal de esta formación está compuesta por areniscas, limolitas, fangolitas, areniscas fosilíferas y calcarenitas, que indican un ambiente con sedimentación mixta siliciclástica-calcárea en la plataforma continental externa e interna. Los horizontes arenosos pueden constituir un acuífero regional profundo, de bajo rendimiento y de alta salinidad debido a la escasa recarga que

recibe. Localmente consiste de areniscas limosas de grano fino, color verde claro a amarillento, dispuestas en estratos masivos, que hacia la cima incluyen lentes de yeso de color blanco.

Oligoceno

La Formación El Cien (antes llamada Formación San Gregorio o Formación San Isidro) sobreyace a la Formación Tepetate y tiene una edad del Oligoceno. 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, que reflejan 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 coquinoides, limolitas, areniscas con fosfato re-trabajado 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; trabajos posteriores (Mina, 1957; Hausback, 1984; Kim, 1987) utilizaron este nombre para referirse a las rocas de este tipo que afloran en la zona cercana a la ciudad de La Paz.

Está representado en la superficie del acuífero por una secuencia litológica constituida de la base a la cima por: arenisca-conglomerado polimíctico, conglomerado polimíctico y areniscas. Los afloramientos de la arenisca y conglomerado polimíctico, están caracterizados por areniscas de color rojizo en una alternancia de capas con fragmentos de tamaño de la arena, que presentan capas interdigitadas de conglomerados polimíctico, conformado por fragmentos de rocas metamórficas y graníticas del tamaño de las gravas. Como un cambio de lateral de facies, de manera concordante y transicional, se presenta un conglomerado polimíctico de color pardo en superficies intemperizadas, de textura de grano grueso a muy grueso, sub redondeado, con imbricación sedimentaria y matriz escasa compuesta por arenas y arcillas.

Oligoceno-Mioceno

Formación Comondú

Forma la Sierra La Giganta cuyo origen se asocia a un arco volcánico de esta edad (Heim Arnold, 1922). Está constituida por una alternancia de materiales volcánicos y sedimentarios que incluye areniscas, conglomerados, brechas volcánicas, andesitas y tobas. Las areniscas y conglomerados se encuentran complejamente

interestratificadas e intrusionadas por diques de composición intermedia y básica. Las tobas y brechas presentan una composición predominantemente básica, en ocasiones intrusionadas por diques. Su espesor se estima en más de 1,200 m. Fue dividida en dos unidades diferentes por Federico Mina (1957). La unidad inferior está formada principalmente por conglomerados, areniscas y en menor proporción argilitas; en tanto que la unidad superior está constituida por rocas piroclásticas y volcánicas, de composición andesítica, basáltica y riolítica, así como conglomerados lenticulares y brechas de talud. Aunque generalmente se considera que presenta permeabilidad baja, la presencia de fracturamiento favorece la recarga hacia los rellenos aluviales del Cuaternario y la existencia de manantiales en la Sierra La Giganta.

Localmente, está representado por brecha volcánica andesítica y conglomerado oligomíctico que consiste de fragmentos de rocas andesíticas y basálticas en una matriz de arena. Interdigitada con la unidad anterior se presenta una secuencia vulcanoclástica constituida por areniscas y conglomerado oligomíctico, sobreyace a la brecha con contactos irregulares, la secuencia está constituida de arenisca volcánica, conglomerado oligomíctico y tobas pumicíticas intercaladas concordantes entre sí. Se presentan también riodacitas en forma de mesetas que cubren las cimas de cerros aislados; así como basaltos contemporáneos que afloran en forma de cerros aislados.

Plioceno

Formación Salada

Definida formalmente por Heim (1922) para describir la secuencia de areniscas de grano medio a fino con algunas intercalaciones de arcilla, limolitas, coquinas y gran contenido de fósiles, que afloran 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. La gran variedad de fósiles permite asignarle una edad correspondiente al Plioceno y sus características litológicas sugieren un ambiente de depósito asociado con aguas someras y cálidas, muy cercanas al mar, en donde las fluctuaciones del agua permitieron el depósito de materiales granulares. Cubre de manera discordante a los sedimentos más antiguos y se encuentra enmascarada por capas de aluvión y materiales arenosos.

CUATERNARIO

El Pleistoceno está representado por terrazas marinas y aluviales, así como por depósitos de dunas, con mayor desarrollo sobre la planicie costera occidental. Durante el Holoceno se depositaron sedimentos continentales constituidos por conglomerado polimíctico mal clasificado, depósitos eólicos y depósitos lacustres asociados con depresiones, que cubren zonas aisladas del acuífero en su porción centro-norte, en la

zona costera sujeta a inundaciones periódicas por efecto de las mareas y avenidas extraordinarias de los arroyos en tiempos de lluvias. Ocupan zonas topográficamente bajas, cubiertas parcialmente por vegetación halófila, como pasto salado y manglares. Los sedimentos eólicos están restringidos a la porción norte del área, en la punta de la barrera arenosa conocida localmente como El Mogote. Consisten en una serie de dunas costeras formadas por el transporte de agentes litorales (mareas y el viento). Los sedimentos aluviales, forman parte del relleno de las cuencas de La Paz en la región occidental y San Juan de Los Planes en el sector sureste, así como la parte activa de los cauces de los arroyos. Sobreyacen, discordantemente, a la mayoría de las unidades preexistentes.

4.2. Geología estructural

La geología estructural está dominada por la actividad de las fallas El Carrizal (ubicada fuera de la zona del acuífero) y San Juan de Los Planes, las cuales definen las cuencas La Paz en la porción occidental y San Juan de Los Planes en el sector sureste, consideradas como fosas, separadas por la sierra Las Cruces, que representa el pilar tectónico entre ambas. Estas fallas pertenecen a un sistema regional de fallas normales transpeninsulares, orientado casi en dirección norte-sur, relacionado con la apertura del golfo de California. La falla San Juan de Los Planes II es la estructura más prominente de este tipo, se localiza en el extremo oriental (fuera del área que comprende el acuífero), con orientación preferencial norte-sur y una curvatura pronunciada hacia el noreste en la sierra de Las Cruces. Su cinemática muestra que es una falla de tipo normal, con el bloque caído hacia el este, corta rocas graníticas y tonalíticas y las pone en contacto con areniscas y conglomerados pleistocénicos. Se interpreta que esta falla está activa debido a que se observan otras fallas paralelas a ella, que cortan y desplazan depósitos del Pleistoceno (Carta Geológico Minera La Paz G12-D83, escala 1: 50,000; SGM, 2008).

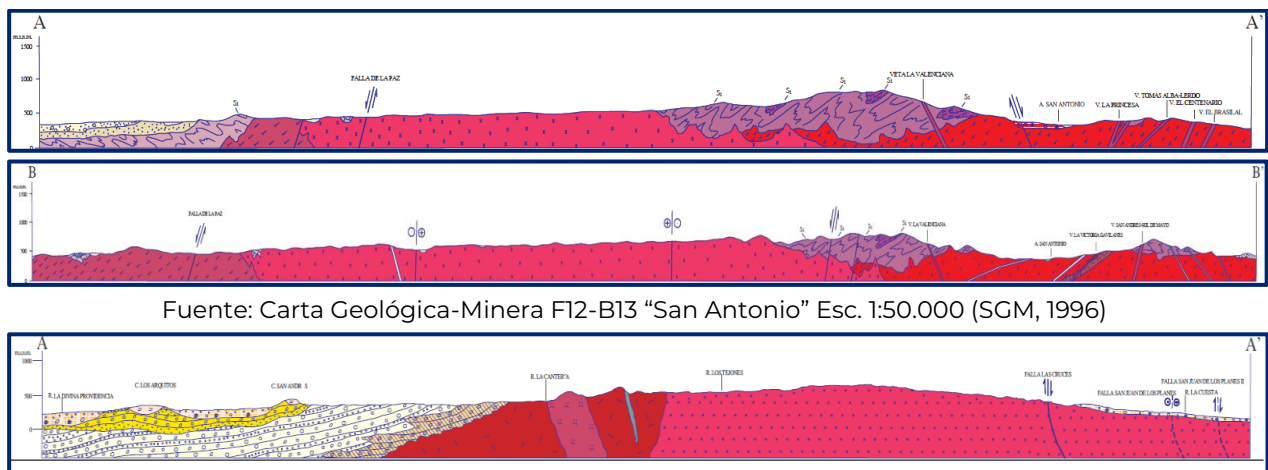
Estructuralmente el área estudiada está controlada por cinco direcciones de estructuras en general, que corresponden a fallamientos normales y laterales. El primero tiene un rumbo N10°-42°W con buzamiento tanto al NE como al SW, sus longitudes varían de 400 m a 35 km o más, saliendo de la zona del acuífero como la falla normal El Carrizal (La Giganta); la segunda dirección es de norte-sur franco a N05°E con buzamiento tanto al oriente como al poniente, su longitud alcanza 40 km como la falla La Paz y gran cantidad de fallas menores. La tercera dirección de fallas normales es N24° a 39°E, sus magnitudes llegan a 25 km. El cuarto arreglo tiene un rumbo N45° a 65°E con longitudes hasta de 40 km; el último sistema tiene dirección N65°-80°W a E-W franco. Estas dos últimas direcciones corresponden a fallamientos

laterales posiblemente conjugados, los cuales están desplazados por fallas normales (Carta Geológico Minera San Antonio F12-B13, escala 1: 50,000; SGM, 1996).

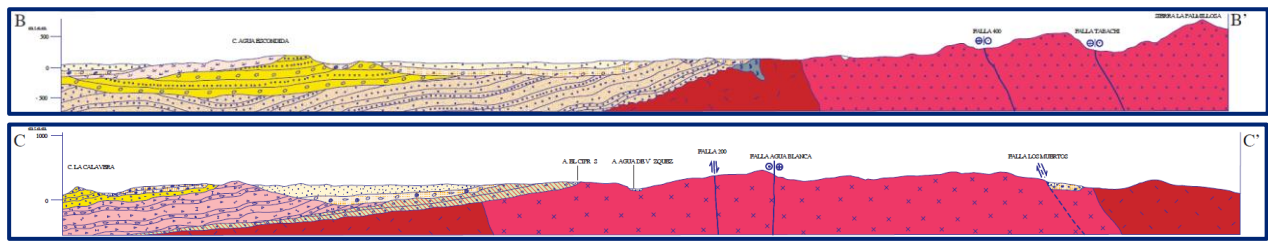
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la reinterpretación de los cortes geológicos, las exploraciones geofísicas y las evidencias de campo, es posible identificar que el acuífero es de tipo libre y está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales y fluviales depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera; la porción inferior se aloja en rocas volcánicas y vulcanoclásticas fracturadas. Con esta información ha sido posible definir un basamento irregular, sobre el que se han depositado 3 unidades geohidrológicas: sedimentos gruesos y areno-arcillosos, rocas volcánicas y piroclásticas y rocas pertenecientes al complejo ígneo-metamórfico. De éstas, únicamente tienen importancia geohidrológica y constituyen acuíferos los depósitos de la primera unidad y, en menor escala, los materiales volcánicos (aglomerados y tobas).

El acuífero presenta un espesor máximo de 400 m, con características de buena porosidad y permeabilidad que le confieren los depósitos de origen aluvial, arenas finas a gruesas con arcillas, gravas, guijarros y cantos rodados, así como materiales terrígenos de origen volcánico como brechas y conglomerados. Esta secuencia presenta como base una capa volcánica poco permeable, que ocasiona condiciones de semiconfinamiento en los materiales de origen volcánico que la subyacen. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están conformados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias, cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento, por las rocas del complejo ígneo-metamórfico (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera F12-B13 "San Antonio" Esc. 1:50.000 (SGM, 1996)



Fuente: Carta Geológica-Minera G12-D83 "La Paz" Esc. 1:50.000 (SGM, 2008)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, así como los cortes litológicos de pozos permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos lacustres, depósitos de arcillas a mayor profundidad en el valle y rocas volcánicas compactas. Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por depósitos clásticos de granulometría variada, conglomerados, sedimentos lacustres y eólicos; en su porción inferior por rocas volcánicas y depósitos vulcanosedimentarios, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por rocas intrusivas que afloran en la porción oriental del acuífero, así como las secuencias metamórficas constituidas por filitas, esquistos y gneises.

El movimiento del agua subterránea en el medio granular está controlado por las variaciones de permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en el medio fracturado su trayectoria depende del patrón de fracturas y fallas, así como de la configuración de los bajos estructurales en el subsuelo.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero en explotación, se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que fueron realizadas en estudios previos. De su interpretación por métodos convencionales se establece que la conductividad hidráulica de los materiales que conforman el acuífero varía de **5 a 60 m/d (5.8×10^{-5} a 6.9×10^{-4} m/s)** y que los valores de transmisividad varían entre **7.6×10^{-4} y 1.6×10^{-1} m²/s**. Los valores de los caudales específicos de los pozos varían entre 2 y 20 lps/m.

En la mayor parte del valle los valores de conductividad hidráulica y transmisividad corresponden a las arenas de grano medio a fino que predominan en el material

clástico. La conductividad hidráulica promedio de los primeros 60 m de espesor del acuífero es de 5.5×10^{-4} m/s (47.5 m/d), la cual disminuye cuando se presentan los materiales vulcanoclásticos. Los pozos más profundos presentan valores de conductividad hidráulica menores debido a la presencia de materiales areno arcillosos a profundidades mayores de 250 m. Hacia las partes bajas del valle, la transmisividad del acuífero decrece debido al aumento de la proporción de sedimentos de grano fino, y es menor a 0.005 m²/s. Los valores mayores que 0.02 m²/s se presentan en las porciones altas de los valles y llanuras, asociados con material detrítico sedimentario. En el medio poroso los sitios con mayor conductividad hidráulica corresponden con facies detríticas de mayor granulometría, así como en las inmediaciones de las zonas de falla, donde las fracturas se encuentran interconectadas y el subsuelo es más permeable.

La información del coeficiente de almacenamiento del acuífero es muy escasa; sin embargo, los resultados de las pruebas de bombeo interpretadas por el modelo numérico de Rathod y Rushton reportan valores que varían entre **0.01 a 0.1** para el rendimiento específico y de **0.00001 a 0.0009** para el coeficiente de almacenamiento.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información de estudios previos, así como la piezometría recabada por la Dirección Local en Baja California Sur de la Comisión Nacional del Agua, para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2013-2019.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2019 muestra que los valores varían, de manera general, de 2 a 120 m, los cuales se incrementan desde la zona costera hacia las estribaciones de las sierras limítrofes y hacia las zonas en las que se ubican los pozos que extraen agua para abastecimiento público-urbano de la ciudad de La Paz. Las profundidades más someras, de 2 a 10 m, se presentan en toda la zona costera, desde El Centenario y Chametla, hasta la zona urbana baja de la ciudad, en tanto que los más profundos, de 100 a 120 m, se registran en las zonas de mayor concentración de la extracción, ubicadas al sureste del acuífero, entre los poblados La Fuente, Cajeme y Calafia (figura 4).

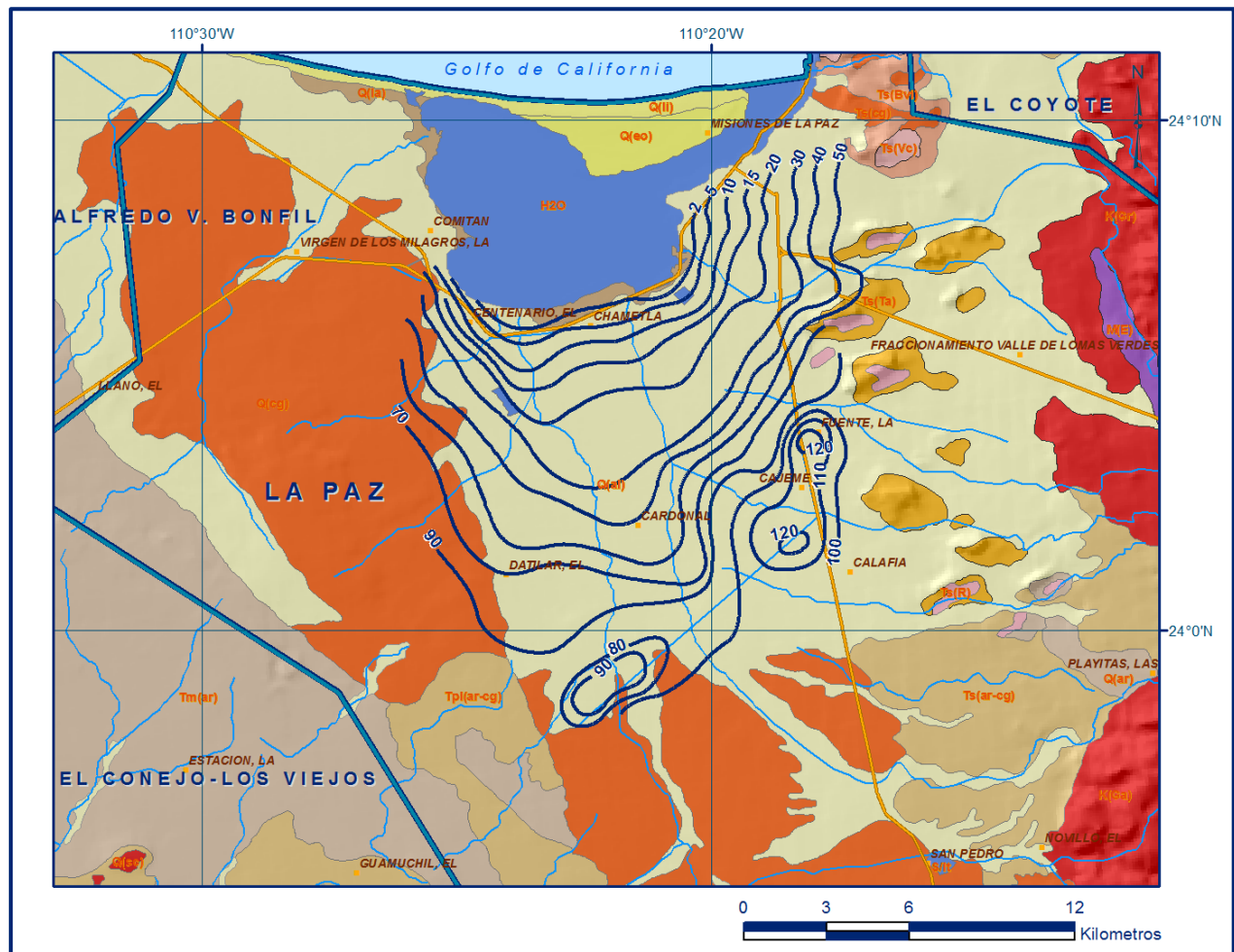


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 2a -35 msnm. En la mayor parte de la superficie de explotación se presentan elevaciones por debajo del nivel medio del mar debido al avance de la intrusión marina, excepto el extremo nororiental, en la zona del arroyo El Cajoncito, en donde se registran valores de 1 a 2 msnm. En las porciones sur, suroriental y oriental del acuífero, en el área comprendida entre Cardonal y La Fuente, se presentan conos definidos por las curvas de 20 a 40 msnm causados por la extracción intensiva y la intrusión marina (figura 5).

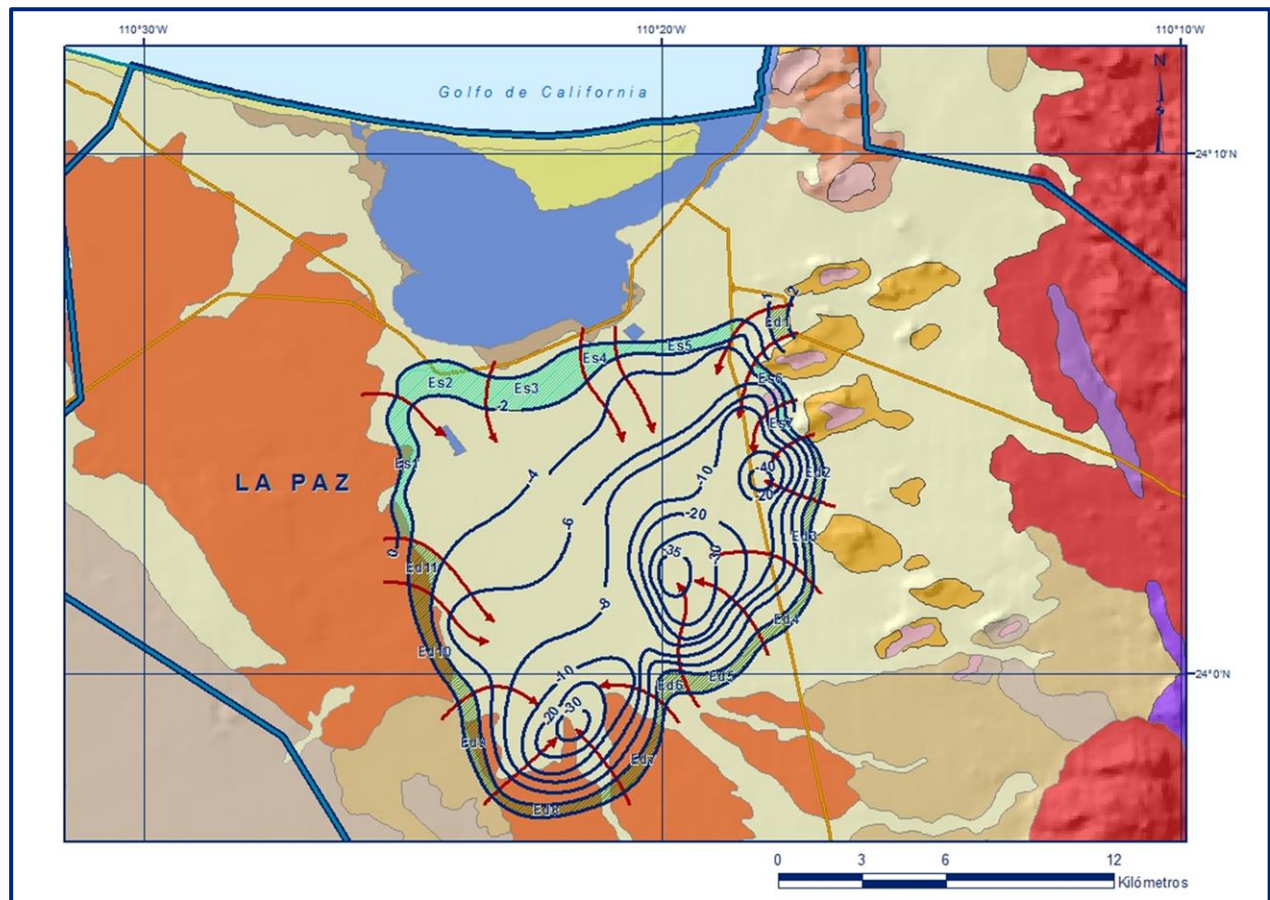


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2013-2019 registra valores de abatimiento que varían desde algunos centímetros, en toda la zona cercana a la costa, hasta 20 y 30 m que se observaron en las zonas de mayor concentración de la extracción. Los mayores abatimientos, de 10 a 30 m para el periodo analizado, que representan un ritmo anual de 1.7 a 5.0 m, se registran en la porción sur y entre Cardonal y La Fuente (figura 6). Se considera que el abatimiento promedio anual es de 1.0 m, que ha disminuido gradualmente con el ingreso de agua salobre causada por la intrusión marina.

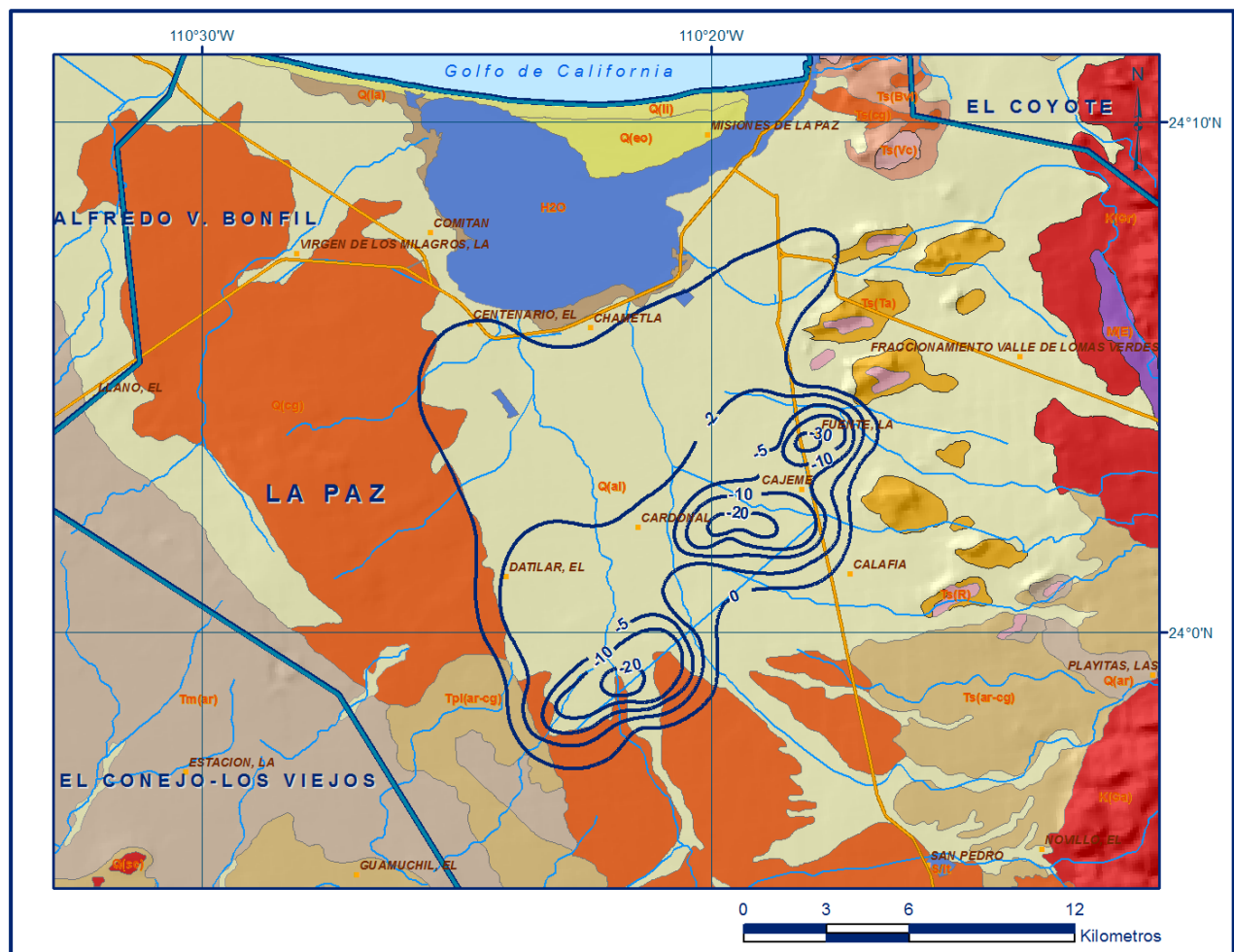


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2013-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del monitoreo de la calidad del agua que lleva a cabo la Dirección Local Baja California Sur, se tomaron 15 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente durante el periodo 2013-2018 en pozos para uso público-urbano y agrícola distribuidos en la zona de explotación y en los acueductos que abastecen de agua potable a la ciudad de La Paz. Así mismo se midieron parámetros de campo y se tomaron 26 muestras de agua subterránea en el año 2018 y 11 muestras en el año 2020, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018-2020). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos (2013-2020) y los obtenidos en el estudio realizado en 2010, se establece que las concentraciones de algunos iones y elementos sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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. La concentración de SDT presenta valores extremos que varían de 404 a 4,500 ppm; las muestras obtenidas en pozos más cercanos a la zona costera sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 ppm establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 para el agua destinada al consumo humano. Los parámetros cuyas concentraciones superan el LMP establecido en la norma son coliformes fecales sólidos disueltos totales, dureza total, y arsénico, con concentraciones máximas de 5,794 NMP/100 ml, 4,500 mg/l, 1433 mg/l de CaCO_3 , 0.046 mg/l respectivamente. En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), el agua se clasifica como dulce a marina, de acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores oscilan entre 399 y 5057 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores de temperatura varían de 27.5 a 31.8°C y el pH de 7.0 a 8.1.

Las mayores concentraciones de STD y valores más altos de CE se registran en las zonas de concentración del bombeo; en donde de forma inducida se produce una mezcla con el agua de mayor salinidad que se extrae de los niveles más profundos. De manera general las concentraciones más altas de STD se registran en la zona costera y las menores en la porción sur del acuífero, mostrando de esta manera la trayectoria preferencial del flujo subterráneo de sur a norte. Para el año 2019 la curva de elevación 0 msnm se ubicaba en promedio en la porción central del acuífero a 15 km de la costa y la cuña de agua marina se localiza a 13 km en la zona del aeropuerto, a 10 km al sur de la zona urbana de La Paz.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las muestras analizadas se clasifican como $\text{C}_1\text{-S}_1$ y $\text{C}_2\text{-S}_1$, que representan agua de salinidad baja a media y contenido bajo de sodio intercambiable; la primera apta para la agricultura sin restricción de cultivos ni de suelos, y la segunda con restringida a cultivos medianamente resistentes a la salinidad en suelos con buen drenaje o requerir lavados periódicos.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predomina la familia sódico-clorurada, característica de las zonas con influencia de la intrusión marina. Hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, algunas muestras pertenecen a

las familias cálcica-bicarbonatada y sódica-bicarbonatada, que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), se tiene registrado un volumen de extracción de **37.0 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022. De los cuales 28.2 hm³ (76.2%) se destinan al uso público urbano para la ciudad de La Paz, 7.5 hm³ (20.3%) para uso agrícola, 0.6 hm³ (1.6%) para uso doméstico y 0.7 hm³ (1.9 %) para uso industrial.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2013-2019, en una superficie de **178 km²** que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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:

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

7.1. Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua

residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

$$Rv + Eh + Ri + Es - B - Ssb = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Ed: Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)

Es: Entradas por flujo subterráneo horizontal salobre (agua salobre)

Ri: Recarga Incidental

B: Bombeo

Ssb: Extracción de agua salobre

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

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

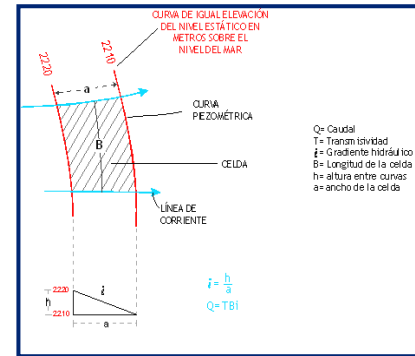
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce es de **4.5 hm³/año**.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
Ed1	1150	600	1	0.00167	0.007	0.0134	0.4
Ed2	2400	950	2	0.00211	0.002	0.0101	0.3
Ed3	2850	350	2	0.00571	0.002	0.0326	1.0
Ed4	2700	400	2	0.00500	0.002	0.0270	0.9
Ed5	3100	500	2	0.00400	0.003	0.0372	1.2
Ed6	1300	850	2	0.00235	0.0030	0.0092	0.3
Ed7	3350	400	2	0.00500	0.0002	0.0034	0.1
Ed8	4500	500	2	0.00400	0.0002	0.0036	0.1
Ed9	3550	600	2	0.00333	0.0002	0.0024	0.1
Ed10	4300	500	2	0.00400	0.0002	0.0034	0.1
Ed11	1500	1050	2	0.00190	0.0002	0.0006	0.0
TOTAL							4.5

7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Es)

Las entradas de agua salobre, por flujo subterráneo horizontal, fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas de agua dulce, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5. El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **13.4 hm³/año** (tabla 3).

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
Es1	4050	550	2	0.00364	0.0179	0.2636	8.3
Es2	1850	250	2	0.00800	0.0020	0.0293	0.9
Es3	1400	300	2	0.00667	0.0020	0.0185	0.6
Es4	5100	500	2	0.00400	0.0017	0.0351	1.1
Es5	3200	1250	2	0.00160	0.0027	0.0140	0.4
Es6	3400	1250	2	0.00160	0.0082	0.0446	1.4
Es7	1250	870	2	0.00230	0.0082	0.0236	0.7
TOTAL							13.4

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

7.1.4. Recarga incidental (R_i)

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

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 15 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea entre 20 y 40 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 16.0 hm^3 anuales, de los cuales 7.5 hm^3 son de agua subterránea y 8.5 hm^3 de agua residual tratada en la zona de Chametla. Si consideramos que un 15% de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 2.4 hm^3 anuales. $R_r = 2.4 \text{ } hm^3 \text{ anuales}$.

Por otra parte, las fugas de la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado varían en función del estado físico y antigüedad de las líneas de conducción, así como de la eficiencia en el sistema de abastecimiento. Para el caso de este acuífero, se considera que, del volumen para uso público-urbano, el 35 % recarga de manera efectiva al acuífero. Si el volumen que se utiliza para uso público-urbano es de 28.2 hm^3 anuales, la recarga por esta fuente es de 9.9 hm^3 anuales.

Por lo tanto, la recarga incidental es la suma de los retornos del riego agrícola y la recarga debida a las fugas en la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado, es decir, **Ri = 12.3 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo de agua dulce y salobre.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado promedio de la extracción por bombeo es de **37.0hm³ anuales.**

7.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)

No existe información de la extracción de agua salobre; sin embargo, se considera que su volumen es al menos de la misma magnitud que el volumen de las entradas por flujo subterráneo de agua salobre procedente de la franja costera. Por lo tanto, **Ssb = 13.4 hm³anuales.**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2013-2019 (figura 6). Con base en ella y un valor promedio de rendimiento específico variable entre 0.12 y 0.25, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 177 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

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

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

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2010-2016 se pueden observar en la tabla 4. El volumen del cambio de almacenamiento es de - **16.0 hm³anuales.**

Tabla 4. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2013-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-20	-20.0	2.7	0.12	-6.5
-10 a -20	-15.0	12.1	0.12	-21.8
-5 a -10	-7.5	13.0	0.12	-11.7
-30	-30.0	0.4	0.12	-1.4
-10 a -30	-20.0	2.2	0.12	-5.3
-2 a -5	-3.5	45.5	0.15	-23.9
0 a -2	-1.0	100.9	0.25	-25.2
	TOTAL	176.8	TOTAL	-95.8
	Promedio anual			-16.0

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:

$$R_v = B + S_{sb} \pm \Delta V(S) - E_h - R_i - E_s$$

$$R_v = 37.0 + 13.4 - 16.0 - 4.5 - 12.3 - 13.4$$

$$R_v = 4.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual está definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y la recarga incidental:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 4.2 + 4.5 + 12.3$$

$$R = 21.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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 incidental. Para este caso su valor es **21.0 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero La Paz, no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 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 extraídos 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 **34'488,404 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 21.0 - 0.0 - 34.488404 \\ \text{DMA} &= -13.488404 \text{ hm}^3/\text{año}\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su **déficit** es de **13'488,404 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero La Paz, estado de Baja California Sur.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Manejo integrado de las aguas subterráneas en el acuífero La Paz en el estado de Baja California Sur. Realizado por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.