



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTO DOMINGO (0306), ESTADO DE  
BAJA CALIFORNIA SUR**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>7</b>
3.1 Provincia Fisiográfica.....	7
3.2 Clima .....	9
3.3 Hidrografía.....	10
3.4 Geomorfología.....	11
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
4.1 Estratigrafía.....	14
4.2 Geología estructural.....	19
4.3 Geología del subsuelo.....	20
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	22
5.2 Parámetros hidráulicos .....	22
5.3 Piezometría.....	23
5.4 Comportamiento hidráulico.....	23
5.4.1 Profundidad al nivel estático .....	23
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	24
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	26
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>28</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>28</b>
7.1 Entradas.....	29
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	29
7.1.2 Entradas de agua dulce por flujo subterráneo horizontal (Ehd).....	30
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Ehs).....	31
7.1.4 Recarga incidental (Ri).....	31
7.2 Salidas .....	32
7.2.1 Bombeo (B).....	32
7.2.2 Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb).....	32
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	32
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>34</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	34
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	34
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	35
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	35
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>36</b>

## **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 Santo Domingo, definido con la clave 0306 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-occidental del estado de Baja California Sur, entre los paralelos 24° 18' y 26° 00' de latitud norte y entre los meridianos 111° 02' y 112° 18' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 14,072 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con los acuíferos Mezquital Seco y Loreto; al este con Tepentú y al sur y sureste con Santa Rita. Al oeste su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, se ubica en su mayor parte en el municipio de Comondú; sus extremos norte y oriental pertenecen al municipio de Loreto, en tanto que las porciones sur y suroriental se ubican en territorio 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

ACUÍFERO 0306 SANTO DOMINGO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	112	5	48.6	25	39	24.4	
2	111	56	59.0	25	39	19.8	
3	111	56	12.3	25	41	23.0	
4	111	48	16.4	25	44	4.4	
5	111	36	17.1	25	51	45.4	
6	111	33	32.1	25	54	36.1	
7	111	34	115	25	57	27.7	
8	111	32	43.4	26	0	13.9	
9	111	31	30.8	25	59	4.0	
10	111	29	216	25	58	39.7	
11	111	28	50.6	25	54	49.5	
12	111	25	39.1	25	52	45.7	
13	111	22	218	25	47	40.9	
14	111	22	16.0	25	43	48.7	
15	111	20	12.7	25	42	48.3	
16	111	20	9.3	25	39	46.4	
17	111	18	119	25	39	56.6	
18	111	14	39.4	25	39	16.7	
19	111	16	27.0	25	37	48.9	
20	111	10	39.6	25	32	54.2	
21	111	10	14.3	25	30	4.0	
22	111	7	18.7	25	27	9.1	
23	111	6	14.8	25	28	28.4	
24	111	3	30.2	25	28	42.6	
25	111	2	3.8	25	24	37.6	
26	111	3	16.4	25	18	47.6	
27	111	1	32.8	25	10	18.5	
28	110	55	52.9	25	6	10.7	
29	110	56	18.6	25	4	315	
30	110	57	7.9	25	1	17.4	
31	111	3	317	24	53	25.3	
32	111	9	32.3	24	51	26.5	
33	111	17	519	24	54	8.7	
34	111	26	4.3	24	38	47.6	
35	111	30	10.5	24	38	4.2	
36	111	37	43.4	24	21	42.3	DEL 36 AL 1POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	112	5	48.6	25	39	24.4	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Santo Domingo 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. El 14 de agosto de 1992 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el “Reglamento para el uso, explotación y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Santo Domingo, Municipio de Comondú, en el Estado de Baja California Sur, y que establece la reserva de agua potable respectiva”, que tenía como objetivo el control de la extracción, utilización de las aguas del subsuelo y preservar los mantos acuíferos, para evitar el deterioro de su calidad y garantizar el abastecimiento para todos los usos.

Establece un programa de reducción gradual del volumen de extracción y una zona de reserva de agua subterránea para uso potable en la colonia denominada "Salvatierra". Su territorio se encuentra completamente vedado y 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 DOF el 2 de julio de 1954. Esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En su territorio se localiza el Distrito de Riego 066 "Santo Domingo" y tiene constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Comondú, A.C. (antes "Valle de Santo Domingo"), instalado el 23 de abril de 1998.

## **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 se mencionan los siguientes:

**ESTUDIO INTEGRAL PARA LA REHABILITACIÓN DEL VALLE DE SANTO DOMINGO, B.C.S., Realizado en 1978 por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).** Entre sus conclusiones más importantes destacan que la unidad hidrogeológica constituida por la Formación Salada y los depósitos de relleno del Reciente son los que conforman el acuífero de la región y presentan permeabilidad media a baja. Entre el acuífero del valle y el mar, existe una probable barrera impermeable que ha retardado el avance franco de la intrusión marina hacia la zona agrícola. Del acuífero se extraía un volumen de 126 a 340 hm<sup>3</sup> anuales de agua subterránea que ocasionaron una sobreexplotación de 206.8 hm<sup>3</sup> durante el periodo 1976-1977, formando un cono de abatimiento cuya elevación mínima era de -14 msnm. La salinidad del agua variaba de 400 a 2300 ppm de STD, predominando concentraciones de 70 a 1000 ppm. Recomienda redistribuir la extracción, la tecnificación del riego, controlar las extracciones y construir obras de recarga artificial para aprovechar el agua superficial de los arroyos Santo Domingo y Bramonas. Incluye además el modelo matemático de simulación del flujo subterráneo para analizar diferentes alternativas de explotación.

**ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SANTO DOMINGO, B.C.S. Realizado en 1996 por Desarrollo y Sistemas, S.A. para la Comisión Nacional del Agua.** Este trabajo tuvo como objetivo actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas que imperaban en el acuífero con el objeto de establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Entre sus actividades más importantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo y el balance de aguas subterráneas.

**ESTUDIO DE DETERMINACIÓN DE SITIOS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SANTO DOMINGO, MUNICIPIO DE COMONDÚ, BAJA CALIFORNIA SUR. Realizado en 2011 por Servicios de Ordenamiento de Suelos y Aguas (SOSA) S.R.L. de C.V. para el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Comondú, A.C.** Su objetivo fue proporcionar datos e información de los sitios más adecuados para construir obras de captación de agua superficial que producen eventualmente los eventos ciclónicos, para favorecer la recarga del acuífero.

**SITUACIÓN ACTUAL DE LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO SANTO DOMINGO, 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, para definir las condiciones actuales y su posición. Adicionalmente, evalúa de manera conservadora el impacto económico de la intrusión marina.

**PLAN DE SEGUIMIENTO DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS DEL DISTRITO DE RIEGO 066 SANTO DOMINGO EN EL AÑO 2012 Y SU INCORPORACIÓN EN EL MODELO DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL DISTRITO. Realizado en 2012 por la Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación (ANEI), A.C. para la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.** El estudio tuvo como objetivo actualizar las mediciones piezométricas en pozos ubicados en toda la extensión del distrito de riego y analizar su evolución. Concluye que la evolución del nivel estático registrada en el periodo 2003-2012 indica que el acuífero presentó un ritmo anual de abatimiento de 1.5 m; sin embargo, si se analiza el periodo 2007-2012 se aprecia que los abatimientos son mayores y varían de 0.1 a 3.0 m anuales. Calcula un abatimiento promedio anual de 0.3 m para la superficie del distrito de riego.

**PIEZOMETRÍA, HIDROMETRÍA DE LAS EXTRACCIONES Y RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS EN EL ACUÍFERO SANTO DOMINGO, 2016. 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 aguas del acuífero Santo Domingo. 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 a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica de 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, Subprovincia Sierra La Giganta y Discontinuidad Llanos de La Magdalena.

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 del 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 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 vulcano sedimentarias del Terciario Superior.

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 localizan 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.

### **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 las partes topográficamente más bajas cercanas a la costa el clima es de tipo BW<sub>hs</sub> seco semicálido, con régimen de lluvias en invierno; en la porción central el clima es BW(h´) que corresponde al tipo desértico cálido, muy cálido; por último en las zonas topográficamente más altas de la sierra predomina el clima BW<sub>h</sub>(x) muy árido semi-cálido.

Por la superficie en la que se presenta, predomina el clima BW(h´) que corresponde al tipo desértico cálido, muy cálido con régimen de lluvias en verano, afectado por los eventos ciclónicos como son las depresiones tropicales, tormentas y huracanes, debido a la interacción de factores de latitud, relieve y corrientes marinas.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó información de 31 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero, entre ellas las más importantes son: Ciudad Constitución, Santo Domingo, Puerto San Carlos, Ciudad Insurgentes, Santa Rita y Comondú, cuyo registro comprende el periodo 1980-2014.

Con base en esta información, se determinó que los valores promedio anual de temperatura y precipitación son **22.0 °C y 195.3 mm**, respectivamente. Los valores máximos de temperatura, de 30 a 45 °C, se registran entre los meses de julio a septiembre, en tanto que las mínimas, de 10 a 2 °C, se presentan en diciembre y enero.

Con respecto a las lluvias, las máximas se registran entre los meses de agosto y septiembre, mientras que los meses más secos son de abril a junio. La evaporación potencial promedio para este periodo es de **2,290 mm** anuales.

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 3 “Baja California Suroeste (Magdalena)”, Subregión Hidrológica “Baja California Suroeste”, cuenca “Arroyo Venancio-Arroyo Salado”, subcuencas “Arroyo Santo Domingo”, “Arroyo Santa Cruz”, “Arroyo La Soledad”, “Bahía Magdalena” y “Arroyo Las Bramonas”.

La hidrografía de la superficie comprendida por el acuífero está integrada principalmente por los Arroyos Santo Domingo, La Soledad o Bramonas que atraviesan la zona de este a oeste, así como otros pequeños arroyos que se localizan en la cuenca cerrada local conocida como Llanos de Hiray.

Los arroyos principales mencionados se originan en la zona montañosa de la Sierra La Giganta, presentan una red de drenaje con arreglo dendrítico poco profundo y de fuertes pendientes que, a medida que avanzan hacia la planicie costera, por la disminución del gradiente topográfico se vuelven divagantes hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

Los principales escurrimientos son ocasionados por lluvias provocadas por fenómenos ciclónicos que producen tormentas de fuerte intensidad y corta duración, cuyas avenidas causan pérdidas a los agricultores del valle, pero también una recarga importante al acuífero.

El Arroyo Santo Domingo tiene un área de cuenca de 4,120 km<sup>2</sup>, una de las más grandes de la península, y se origina por la confluencia de los arroyos San Javier y Santa Cruz, que nacen en la Sierra Concepción. Por su parte, el Arroyo Soledad o Bramonas tiene una longitud total de 140 km y una superficie de cuenca de 3,608 km<sup>2</sup>. Sus principales aportadores son los arroyos San Gregorio, Quepo, San Vicente, Cañada del Mezquite, Los Achemes y San Luis. Aguas abajo de la cuenca del Arroyo Las Bramonas, se localiza, frente a Bahía Magdalena, una superficie aproximada de 1,530 km<sup>2</sup> que presenta escaso drenaje debido a la alta permeabilidad de las arenas que la constituyen, en donde se infiltran los escasos volúmenes que ocasionalmente escurren cerca de los poblados El Refugio, San Martín, La Pitaya y La Selva.

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

### **3.4 Geomorfología**

Las zonas montañosas más importantes en la región se ubican en las porciones nororiental y oriental del acuífero y pertenecen a la Sierra La Giganta.

De acuerdo con la topografía, es posible definir una zona baja, con pendiente menor de 5% en donde se ubica el Distrito de Riego 066 “Santo Domingo” y las principales poblaciones; una zona intermedia de transición entre la planicie y las sierras, con pendientes entre 5 y 25% y la zona alta que corresponde a la Sierra La Giganta, con pendientes mayores de 25%. Esto permite identificar tres unidades geomorfológicas principales: planicie costera, mesetas y sierra.

La planicie costera se localiza desde la zona del distrito de riego hasta la costa del Océano Pacífico y pertenece a la Subprovincia Fisiográfica Discontinuidad Llanos de La Magdalena. Es una extensa planicie aluvial con suave declive hacia la costa, en la que se localiza una serie de lomeríos ramificados con bajadas suaves que se observan en la porción suroriental del área; está constituida por sedimentos marinos, depósitos aluviales, fluviales, lacustres y sedimentos eólicos, cuya altitud varía de 0 a 60 msnm. Incluye las topoformas llanura aluvial de piso rocoso y una serie de lomeríos ramificados con bajadas, llanuras con zonas de inundación y dunas altas. Incluye además una serie de barras y la Isla Margarita, que encierran sobre las costas de la discontinuidad a las bahías Santo Domingo, Magdalena, Las Almejas y Santa Marina.

Las mesetas están representadas por capas semihorizontales, con flancos escarpados que por efecto de los agentes erosivos tienden a redondearse formando lomeríos; generalmente están constituidas por rocas sedimentarias de origen marino, que presentan menor competencia a la erosión.

Por último, la zona de sierra pertenece a la Sierra La Giganta y se presenta en toda la porción oriental y nororiental del acuífero, definiendo los parteaguas que delimitan la cuenca. Sus elevaciones varían de 600 a 1500 msnm.

Las tofoformas que se presentan en la porción oriental de la sierra son: i) sierras altas complejas con mesetas, ii) sierras bajas que constituyen la cordillera desde Santa Rita, El Chollero, Ley Federal de Aguas 2, hasta Santa Rosa y iii) lomeríos ramificados con bajadas en las regiones noroeste, este y sureste

#### **4. GEOLOGÍA**

Desde el punto de vista geológico regional, es posible reconocer dos provincias geológicas principales: la cuenca Vizcaíno-Purísima y la Faja Volcánica Sierra La Giganta. Casi toda la superficie del acuífero se localiza en la subcuenca Purísima, la cual tiene como límites al oriente la Sierra La Giganta, al occidente la plataforma continental-marina del Pacífico y al sur el Istmo de La Paz y el Complejo Cristalino de San José del Cabo.

Las unidades más antiguas que conforman el basamento de la Subcuenca Purísima comprenden rocas sedimentarias del Triásico, rocas de naturaleza ofiolítica y rocas ultramáficas parcialmente serpentinizadas, dentro de las cuales se encuentran incluidas las formaciones San Hipólito (Triásico) y Eugenia (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) definidas por Federico Mina (1957).

Las unidades geológicas que conforman el relleno de la subcuenca incluyen la secuencia detrítica de la Formación Valle del Cretácico, las lutitas de facies de talud de la Formación Santo Domingo del Paleoceno, secuencias de areniscas y lutitas de la Formación Tepetate del Paleoceno-Eoceno, lutitas con intercalaciones de diatomeas de la Formación Monterrey del Mioceno Inferior y lutitas bentoníticas y areniscas de la Formación San Raymundo, del Mioceno Superior.

La provincia geológica Faja Volcánica Sierra La Giganta está conformada por una serie de rocas volcánicas (piroclastos, derrames de lava y brechas) y areniscas continentales que constituyen la Sierra La Giganta. Esta secuencia de rocas sobreyace a un batolito de rocas intrusivas graníticas y a rocas metamórficas.

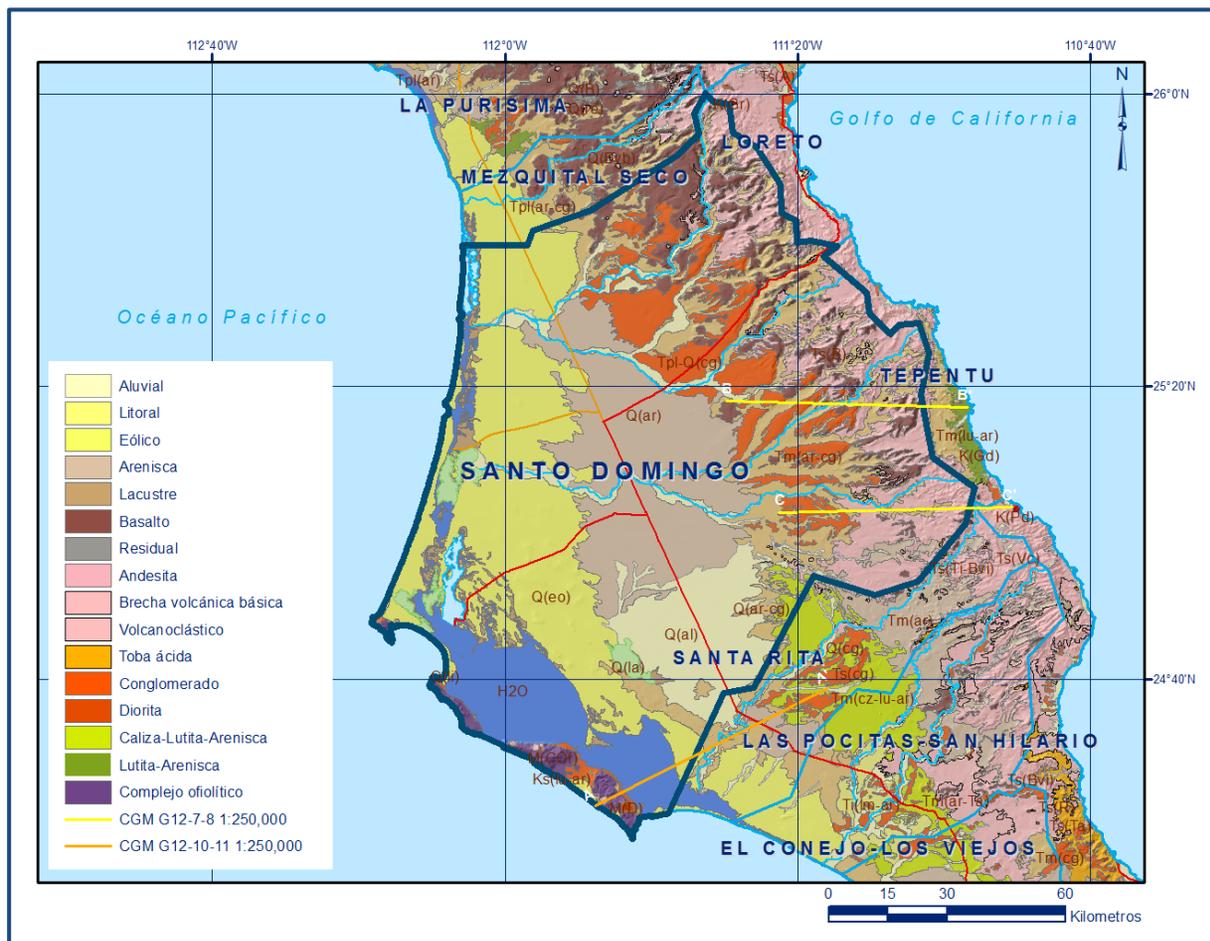


Figura 2. Geología general del acuífero

La columna estratigráfica está constituida por unidades de origen sedimentario (marino- continental) y volcánico, su descripción se realizó en estudios previos y se apoyó en los cortes litológicos de pozos perforados por PEMEX. La mayoría de las formaciones mencionadas no afloran en superficie y su presencia en el subsuelo se identificó mediante perforaciones.

Tal es el caso de las formaciones sedimentarias Valle del Cretácico Superior, que aflora en la Isla Margarita, y Santo Domingo del Paleoceno que fue descrita por Mina (1957) con base en los cortes litológicos de las perforaciones exploratorias de PEMEX Hiray 1, 2 y 4.

El basamento regional de esta secuencia está compuesto por complejos ofiolíticos (Formación Eugenia; Mina, 1957) y secuencias del Triásico-Jurásico (Formación San Hipólito; Mina, 1957) parcialmente metamorfizadas (Lozano, 1976), que no han sido reconocidas en el valle, pero que afloran en la Isla Magdalena.

#### **4.1 Estratigrafía**

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende rocas sedimentarias y volcánicas cuyas edades varían del Cretácico al Reciente.

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente:

### **CRETÁCICO**

#### **Formación Valle**

Descrita originalmente por Mina (1957) en la Isla Margarita. De acuerdo con los cortes litológicos de los pozos Hiray, está conformada por una secuencia detrítica que incluye facies turbidíticas y consiste de lutitas de color gris verdoso a café claro, con intercalaciones de areniscas de grano fino de color gris claro, que presentan un ligero metamorfismo.

Hacia su base se incrementa el contenido de carbonatos, constituyendo lutitas calcáreas y margas con estratificaciones de lutitas bentónicas de color verde oscuro a negro. Su espesor máximo de 2,023 m se registró en el pozo Hiray-2, subyaciendo discordantemente a las formaciones Santo Domingo y Tepetate. De acuerdo con su contenido fosilífero se le asignó una edad correspondiente al Cretácico Superior (Cenomaniano-Maestrichtiano).

### **TERCIARIO (PALEÓGENO)**

#### **Formación Santo Domingo**

Descrita originalmente por Mina (1957) con base en la información litológica del pozo Hiray-1, perforado en la porción norte del acuífero. Comprende una serie de lutitas calcáreas de color gris que alternan con areniscas de grano fino de color gris claro.

Su espesor es del orden de los 1,300 m; sobryace discordantemente a la Formación Valle y subyace de la misma manera a la Formación Tepetate. Por su contenido fosilífero se le asigna una edad correspondiente al Paleoceno.

### **Formación Tepetate**

Constituye la unidad más antigua que aflora en la superficie del acuífero. 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. Su parte basal ésta compuesta por areniscas, limolitas y fangolitas, que alternan con areniscas fosilíferas y calcarenitas, indicando un ambiente con sedimentación mixta siliciclástica-calcárea en la plataforma continental externa e interna. Los depósitos sedimentarios de esta formación se encuentran expuestos en las márgenes de los arroyos.

Contiene horizontes arenosos que pueden constituir un acuífero regional profundo, de bajo rendimiento y de alta salinidad debido a la escasa recarga que recibe. Localmente consiste en 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.

El espesor registrado en los pozos Hiray varía de 10 a 1,330 m; el menor corresponde a la zona sur del valle, debido probablemente a que en esta región la formación fue afectada por procesos erosivos. Subyace discordantemente a las formaciones Salada y Monterrey y sobreyace de la misma manera a las formaciones Valle y Santo Domingo. La edad asignada por Beal (1948) y Mina (1957) es del Paleoceno Superior y Eoceno.

### **Formación Monterrey**

Descrita originalmente por Mina (1957) en los arroyos La Purísima y San Raymundo (ubicados fuera del área del acuífero) en donde consiste de dos miembros: el inferior compuesto por lutitas de color verde claro con intercalaciones de limolitas de color amarillo a verde y areniscas, que en conjunto presentan un espesor de 70 m. El miembro superior está constituido por lutitas silicificadas de color negro, con intercalaciones de areniscas de color gris claro; con un espesor promedio de 30 m y presencia de plegamiento intenso. Beal (1948) la definió en el arroyo La Purísima con el nombre de Formación San Gregorio.

Localmente aflora en las inmediaciones de los arroyos San Luis y Salado en forma de lomas de baja elevación, de pendiente suave. Incluye lutitas de color gris verdoso a café con costras y vetillas de pedernal de color café oscuro, que alternan con capas de espesor mediano de areniscas de grano fino de color gris verdoso.

En los escasos afloramientos presenta intenso plegamiento. Su espesor registrado en los pozos Hiray 1 y 2 oscila entre 15 y 215 m. Sobreyace discordantemente a la Formación Tepetate y subyace también de la misma manera a las formaciones San Raymundo, Comondú y Salada. Con base en su contenido fosilífero, Mina (1957) le asigna una edad correspondiente al Mioceno Medio.

### **Formación San Raymundo**

Fue definida formalmente por Mina (1957) en el arroyo San Raymundo donde aflora en forma de arcillas bentoníticas que presentan un espesor promedio de 80 m. En la superficie del acuífero aflora ampliamente en la porción suroriental, en la vecindad de los arroyos San Luis y San Vicente. Consiste de lutitas calcáreas y calizas de color gris claro, con abundante contenido de fósiles. De manera ocasional incluye areniscas de grano medio a grueso de color gris claro, dispuestas en estratos de 0.2 a 0.3 m de espesor, interestratificados con tobas riolíticas de color café rosado. Su espesor en el subsuelo varía de 60 a 85 m. Sobreyace discordantemente a la Formación Monterrey y subyace también en contacto discordante a la Formación Comondú.

### **Formación Comondú**

Heim (1922, en Mina 1957) definió con este nombre a un conjunto de areniscas, conglomerados, aglomerados, tobas, derrames riolíticos, andesíticos y basálticos que afloran en el arroyo Comondú, ubicado fuera del límite del acuífero. Aflora ampliamente en la porción oriental del acuífero, conformando la Sierra La Giganta cuyo origen se asocia a un arco volcánico del Oligoceno-Mioceno (Heim 1922). 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 máximo se estima en 1,200 m. La litología que aflora en el arroyo Santo Domingo comprende aglomerados de color café, con clásticos de rocas ígneas, así como conglomerados polimícticos de clastos de andesitas y basaltos, muy consolidados y con fracturas verticales. 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.

### **Formación Salada**

Definida formalmente por Heim (1922) para describir la secuencia de areniscas de grano medio a fino, calizas impuras y limolitas, con algunas intercalaciones de coquinas, que afloran en las inmediaciones del Rancho Salada, ubicado fuera del área del acuífero. Mina (1957) incluyó dentro de esta misma formación una serie de conglomerados basálticos, calizas y areniscas de grano fino a medio con restos de fósiles.

Aflora ampliamente a lo largo de la costa del Pacífico, desde Todos Santos hasta el arroyo Santa Rita, dentro del área del acuífero en su porción central, en las zonas adyacentes a la margen occidental de la Sierra La Giganta y en la planicie de los arroyos Santo Domingo y Soledad, donde está conformada por areniscas de grano fino, de color café, con fragmentos de rocas ígneas, dispuestas en estratos de 0.3 a 0.4 m de espesor, con interestratificaciones de conglomerados; ambas litologías se presentan poco consolidadas.

La gran variedad de fósiles permite asignarle una edad correspondiente al Plioceno. Las 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.

Su espesor en el subsuelo está controlado por la estructura denominada Alto Santo Domingo, alcanzado un valor máximo de 185 m en la porción norte del acuífero.

### **CUATERNARIO**

Está representado por depósitos aluviales, de pie de monte, eólicos, lacustres, de playa y fluviales. Los depósitos aluviales se presentan en forma de abanicos y depósitos de pie de monte, de granulometría variada y mal clasificada; se observan en la porción nororiental del acuífero y su espesor máximo es de 15 m.

Los depósitos de pie de monte están compuestos por cantos, gravas y arena mal clasificados, de composición basáltica principalmente, que se localizan en la porción nororiental del área, cubriendo las laderas de las mesetas. Su espesor es irregular, disminuyendo hacia las estribaciones de las sierras.

Los depósitos eólicos se distribuyen en la porción central de la zona costera, formando antiguas dunas estabilizadas que constituyen una serie de lomeríos de formas suaves cuya altura varía de 5 a 10 m, compuestas de arenas finas que contienen cuarzo, feldespatos y micas; presentan estructura laminar y estratificación cruzada.

Los depósitos recientes incluyen dunas y barchanas pequeñas que presentan alturas de 0.5 a 1 m, compuestas de arenas finas y limos de color que varía de café rojizo a amarillento. Los depósitos lacustres se localizan en la zona costera, sobre antiguos lagos y/o lagunas, están compuestos por arenas de grano fino y limos de color rojizo, con fragmentos de conchas; su espesor máximo es de 2 a 3 m.

Los depósitos fluviales se restringen a los cauces de los ríos y arroyos, su granulometría es variada, disminuyendo desde las porciones topográficamente más altas desde cantos y gravas de rocas volcánicas hasta arenas y arenas limosas en los arroyos tributarios de la planicie. Su espesor promedio es de 20 m.

Por último, los depósitos de playa se localizan en la porción más occidental del área, conformando la franja costera y están constituidos por una serie de dunas transversales y longitudinales, de arenas finas de cuarzo bien clasificadas, que presentan una altura que varía de 1 a 5 m.

### **Rocas Ígneas Extrusivas**

Comprenden una serie de derrames y conos cineríticos compuestos de basaltos de olivino de color gris oscuro y grano fino, que se localizan principalmente en la porción nororiental y centro-oriental del área, donde forman una serie de mesetas. Los derrames cubren discordantemente a Formación Salada a la altura de los Ranchos Tijuana, San Ignacio y Tepentú, y en la Sierra La Giganta a la Formación Comondú.

El espesor de los derrames varía en la zona, de 5 a 10 m en las estribaciones de la Sierra La Giganta, hasta alcanzar 40 m en las regiones altas de la misma.

Están cubiertos gradualmente por depósitos aluviales, que nuevamente dejan al descubierto angostas cejas en las estribaciones de la sierra; en cambio hacia las zonas topográficamente más altas se presentan en forma de franjas constituidas por varias coladas.

#### **4.2 Geología estructural**

El marco tectónico de la región está íntimamente ligado a la historia geológica del margen noroccidental mexicano durante el Mesozoico Superior-Terciario Inferior y a la posterior apertura del Golfo de California.

El margen continental del noroccidente de México fue la placa superior o pasiva de una frontera de placas convergente a lo largo de la mayor parte del Terciario (Atwater, 1970) que dio origen a un arco volcánico. Las rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno en el occidente de México están claramente relacionadas con esta subducción terciaria.

En el marco geológico de la región del Golfo de California y de la Península de Baja California, los eventos magmáticos están íntimamente relacionados con los regímenes tectónicos de esta subducción del Terciario (entre 16 a 12.5 Ma.) y con un proceso de apertura continental, en un marco tectónico de extensión que inició aproximadamente hace 13 Ma.

Los granitos y granodioritas, que constituyen el basamento de la región, en algunas localidades 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 que dieron origen al Golfo de California durante el Terciario Superior (Carta Geológica-Minera G12-7-8 "Villa Constitución" Escala 1:250,000. SGM, 2000).

Dentro de la subcuenca La Purísima se han identificado estructuras importantes que presentan una orientación preferencial NW-SE: Sinclinal La Soledad, Alto Estructural Santo Domingo y Alto Estructural Magdalena (ACSA, 1969; TMI, 1978, en CONAGUA,1996), identificadas en el subsuelo mediante la interpretación de estudios geofísicos y los registros litológicos de pozos profundos (Mina, 1957).

El alto Santo Domingo se localiza en la porción central del valle y su configuración controla el espesor de la Formación Salada, ya que sobre esta estructura se han medido los menores valores, contrario a lo que sucede en el Sinclinal La Soledad, ubicado inmediatamente al occidente de él, donde se registran los mayores espesores de esta formación.

Las evidencias magnéticas, gravimétricas y batimétricas en las inmediaciones de la Isla Margarita y su proyección hacia el continente, en el área del Puerto de San Carlos, permitieron identificar la presencia del Alto Magdalena, conformado por las rocas del Neógeno Inferior (Tepetate y Santo Domingo) y del Cretácico (Formación Valle).

De manera directa, se identificó su existencia en el pozo Hiray-2, perforado en la desembocadura del Arroyo Bramonas en el Océano Pacífico, a una profundidad de 365 m, definido por la configuración topográfica en el subsuelo de las formaciones arcillosas que subyacen a la Formación Salada.

#### **4.3 Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información de los registros litológicos de pozos, interpretación de estudios geofísicos y las evidencias de la geología superficial, es posible identificar que el acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, lacustres y conglomerados depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera; la porción inferior se aloja en rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas.

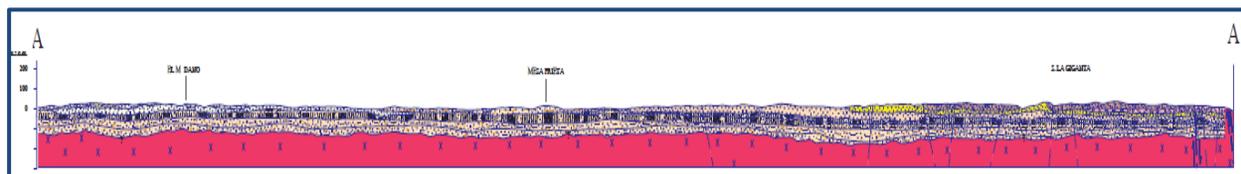
Debido al reducido espesor de los depósitos cuaternarios y al abatimiento de los niveles del agua subterránea, actualmente el acuífero se restringe a la Formación Salada, que constituye un medio de doble porosidad, depositado sobre un basamento irregular constituido por formaciones arcillosas.

El acuífero presenta un espesor máximo de 200 m, con características de permeabilidad media que le confieren los depósitos de origen aluvial y fluvial, constituidos por arenas finas a gruesas con arcillas, gravas, guijarros y cantos rodados, así como rocas fracturadas (figura 3).

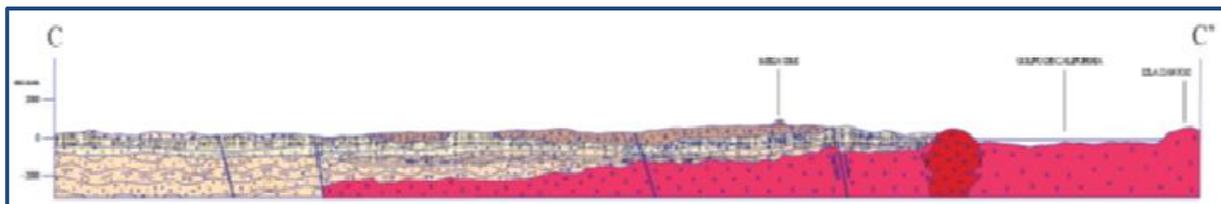
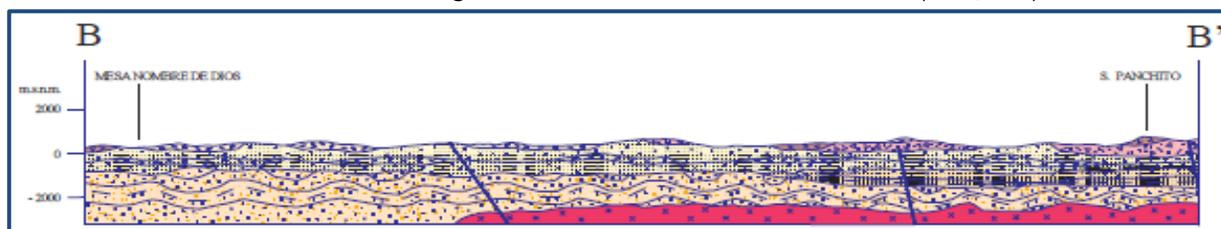
Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están conformados por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas, cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento el basamento o frontera vertical inferior del acuífero,

está constituido por formaciones limo-arcillosas de baja permeabilidad (Formaciones San Raymundo, Monterrey, Tepetate) que subyacen a la Formación Salada, ubicado a profundidades máximas entre 120 y 140 metros. La frontera sur, oriente y norte del acuífero están constituidas por afloramientos de los derrames volcánicos compactos de baja permeabilidad que conforman la Sierra La Giganta, que constituye el parteaguas oriental de la cuenca hidrológica.

Adicionalmente, se confirmó la existencia de un potente espesor de limos y arcillas denominado Alto de La Magdalena, que limita lateralmente al acuífero en su porción occidental y funciona como una barrera de baja permeabilidad que protege al agua dulce del acuífero de la intrusión marina. La interpretación de las exploraciones directas realizadas por PEMEX en los pozos Iray 2, 3 y 4 (cortes litológicos y registros eléctricos) confirman que el acuífero actualmente en explotación sobreyace a las Formaciones Tepetate y Santo Domingo, constituidas por material limo arcilloso de baja permeabilidad saturado con agua de salinidad equivalente al agua marina, que presentan al menos 3,000 m de espesor. Esto confirma que no existen posibilidades de encontrar un acuífero con agua de buena calidad perforando pozos a mayor profundidad



Fuente: Carta Geológica-Minera G12-10-11 "La Paz" Esc. 1:250.000 (SGM, 1999)



Fuente: Carta Geológica-Minera G12-7-8 "Villa Constitución" Esc. 1:250.000 (SGM, 2000)

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 posibilidad de presentar 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 sedimentarias y volcánicas de la Formación Comondú que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Debido al abatimiento de los niveles del agua subterránea, actualmente los depósitos cuaternarios se han drenado y forman parte de la zona no saturada. El acuífero se aloja en la Formación Salada, la cual presenta cambios de facie, tanto lateral como verticalmente.

El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por las tobas arcillosas que forman parte de la Formación Comondú, las calizas impuras, limolitas y coquinas de la Formación Salada y la secuencia de rocas arcillosas de las formaciones San Raymundo, Monterrey, Tepetate y Santo Domingo. 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 y mediante pruebas directas a través de permeámetros, se establece que la conductividad hidráulica de los materiales que conforman el acuífero varía de **0.5 a 16 m/d ( $5.8 \times 10^{-6}$  a  $18.5 \times 10^{-4}$  a m/s)** y que los valores de transmisividad varían entre  **$6.0 \times 10^{-4}$  y  $14.4 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/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 obtenida por el numérico de Rathod and Rushton (1991) es un orden de magnitud mayor: entre **2.0 y 50.0 m/d** ( **$2.3 \times 10^{-5}$  a  $5.8 \times 10^{-3}$  a m/s**); su valor promedio para 70 m de espesor del acuífero es de  **$2.7 \times 10^{-4}$  m/s (23.3 m/d)**, la cual disminuye cuando se presentan materiales de granulometría más fina. En el medio poroso los sitios con mayor conductividad hidráulica corresponden con facies detríticas de mayor granulometría que conforman los depósitos aluviales y fluviales.

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 0.15** para el rendimiento específico y de **0.00001 a 0.0005** 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 y por el Distrito de Riego, para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2003-2015.

### **5.4 Comportamiento hidráulico**

#### **5.4.1 Profundidad al nivel estático**

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2015 muestra que los valores varían, de manera general, de 15 a 80 m, los cuales se incrementan hacia el centro del distrito de riego.

Las profundidades más someras, de 15 a 35 m, se presentan en las porciones norte, sur, oriental y occidental del acuífero, en tanto que los más profundos, de 70 a 80 m, se registran en las zonas de mayor concentración de la extracción, ubicadas al sureste de Ciudad Insurgentes y en torno de Ciudad Constitución (figura 4).

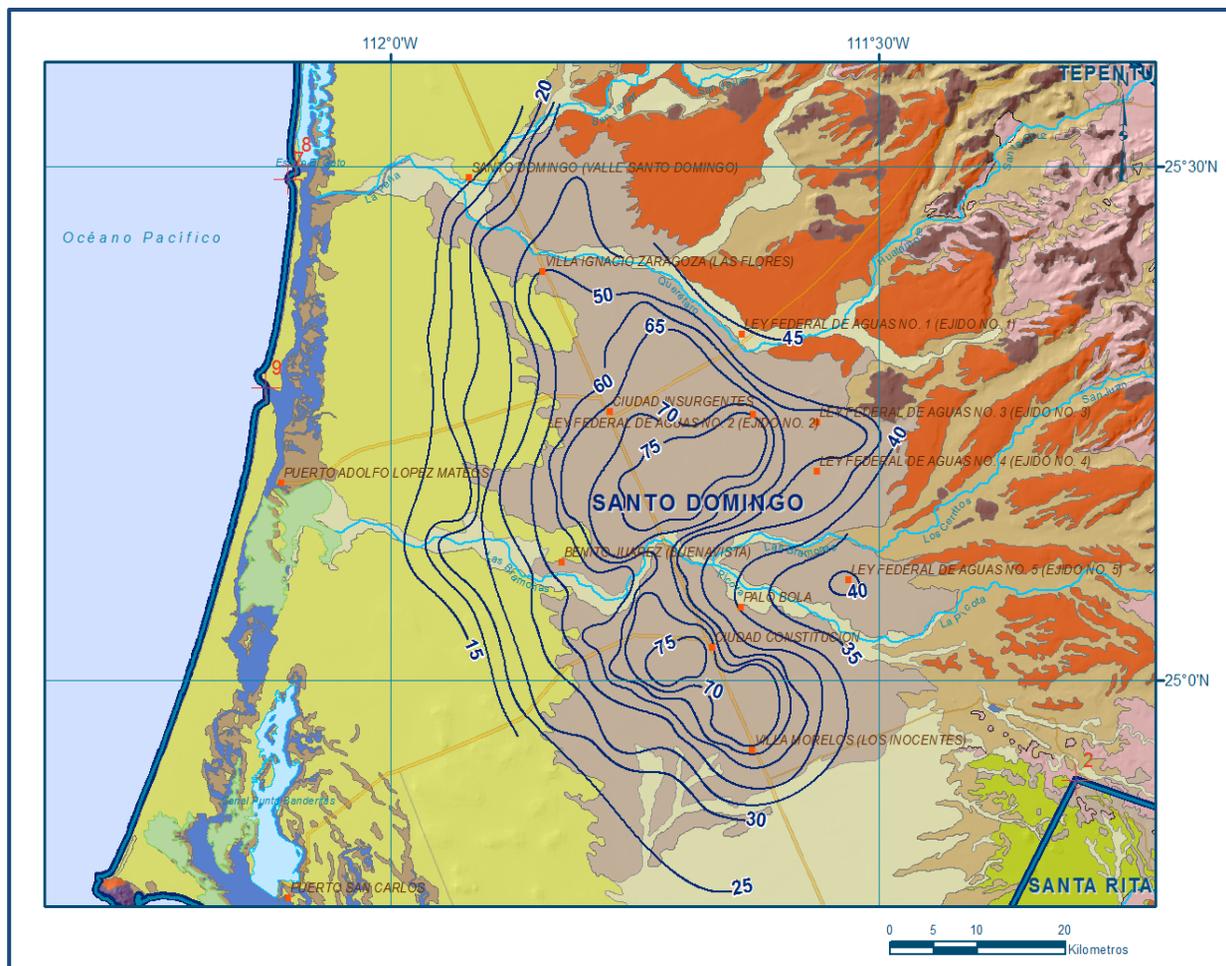


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2015 registró valores que variaron de -40 a 40 msnm.

En la mayor parte de la superficie del distrito de riego se presentan elevaciones por debajo del nivel medio del mar, con excepción de su extremo oriental en donde se registran valores de 5 a 50 msnm.

En la porción central del distrito de riego, en el área comprendida entre Ciudad Constitución y Ciudad Insurgentes, se presentan conos de abatimiento definidos por las curvas de 35 a 40 msnm.

En toda la franja occidental del distrito de riego, se presenta el ingreso de agua salobre procedente de la franja costera, de la cota de elevación 0 a -10 msnm (figura 5).

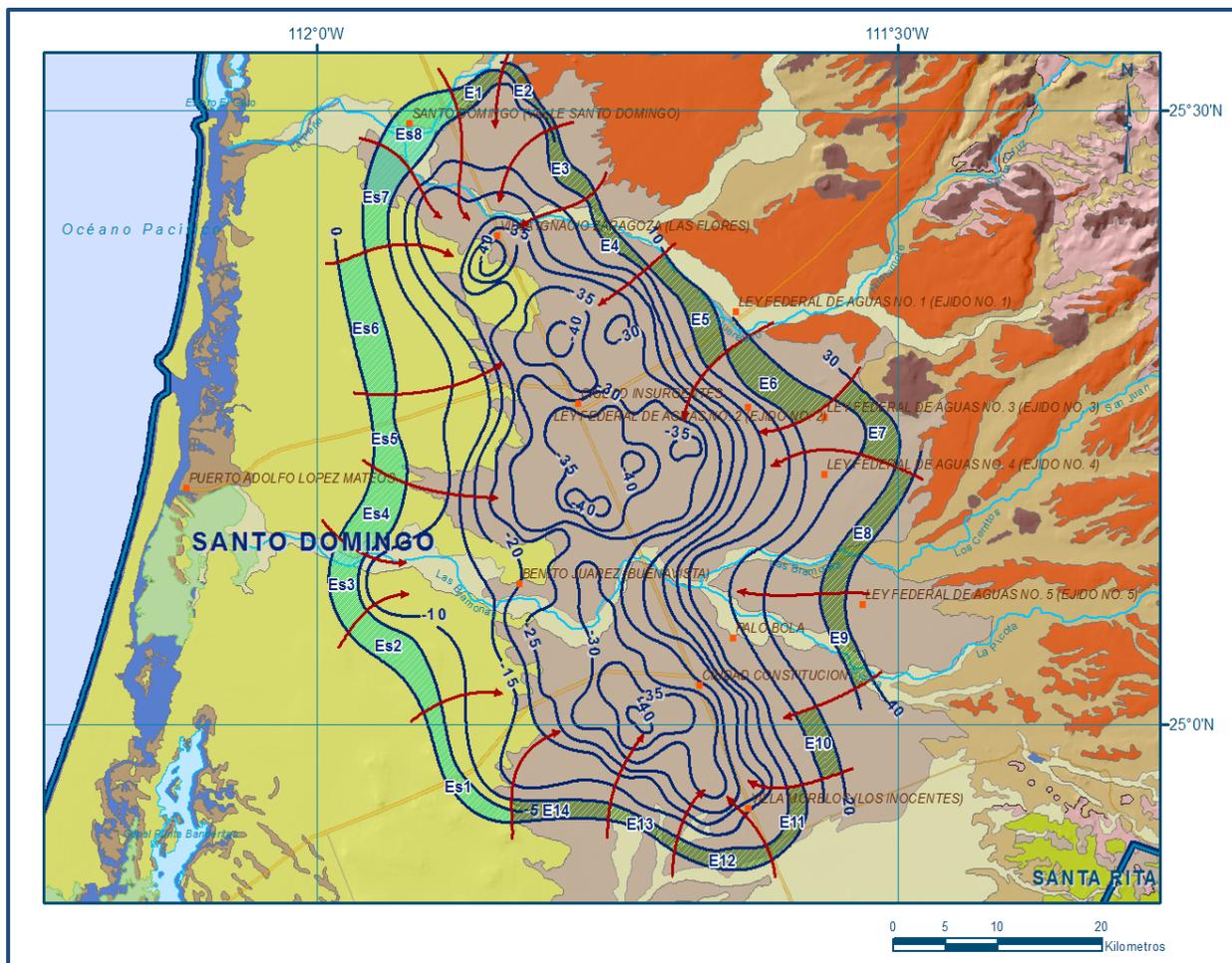


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2003-2015 registra valores de abatimiento desde algunos centímetros, en toda la periferia del distrito de riego, hasta 10 m en las zonas de mayor concentración de la extracción.

Los mayores abatimientos, de 5 a 10 m para el periodo analizado, que representan un ritmo anual de 0.4 a 0.8 m, se registran en la porción centro-norte del distrito de riego, desde Ciudad Insurgentes hasta el Arroyo Bramonas, así como en la zona ubicada al oeste y suroeste de Ciudad Constitución (figura 6).

Se considera que el abatimiento promedio anual es de 0.3 m para toda la superficie agrícola. Aunque en la última década el volumen de extracción por bombeo se ha mantenido estable, el incremento en el ritmo anual de abatimiento en algunos periodos de evolución, es el resultado de años de estiaje.

El extremo sur del distrito de riego es la zona más vulnerable y la más afectada por los abatimientos debido a que en ella se presentan los menores espesores saturados.

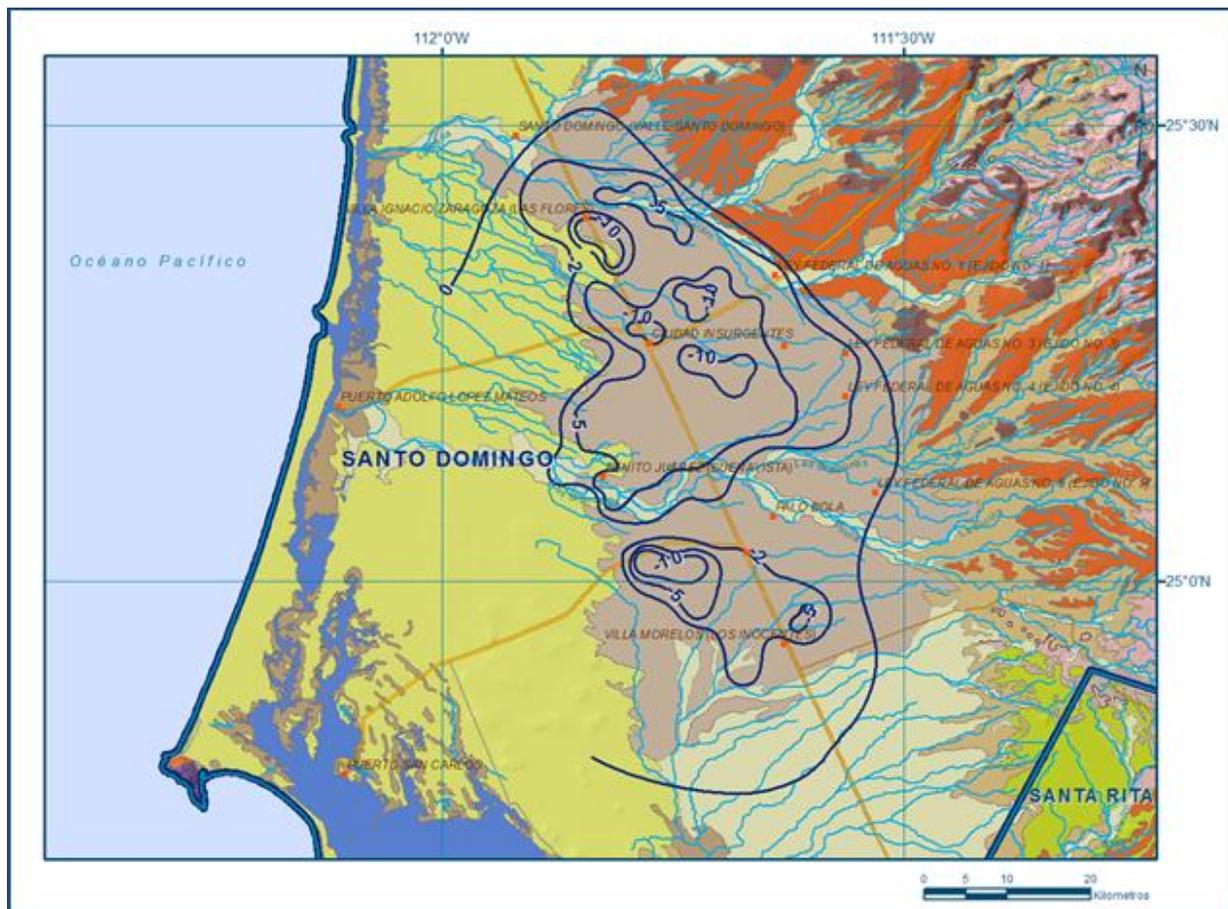


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2003- 2015)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo con la información de las determinaciones in situ realizadas en 2011 y 2016 (CONAGUA), los valores de conductividad eléctrica (CE) oscilan entre 903 y 9,240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que de de acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), clasifica al agua como dulce a salobre ya que los valores máximos de conductividad eléctrica superan el valor de 2,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De acuerdo con esto, se asocian concentraciones de Sólidos Totales disueltos (STD) de 530 a 5,500 mg/l.

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; las

menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción oriental del acuífero, principalmente a lo largo del cauce de los ríos Bramonas y Santo Domingo y de los arroyos. El espesor saturado promedio de 70 m en la porción central del distrito de riego presenta concentraciones de STD de 1,500 a 2,500 mg/l. Con respecto a las familias de agua predominantes, de acuerdo con los iones mayoritarios presentes, se identifican 3 grupos para las diferentes zonas del acuífero: El grupo 1 incluye a las familias bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-mixta, que se asocian con las zonas de recarga que representan agua de reciente infiltración; el grupo 2 considera las familias mixta-mixta y mixta sódica; el grupo 3 incluye a las familias clorurada-sódica y clorurada-mixta.

Los diagramas que muestran el comportamiento de la relación de (litio)  $\text{Li}^+$  vs (cloro)  $\text{Cl}^-$ , usados como elementos traza conservativos, presentan una tendencia lineal que representa una línea de mezcla entre dos miembros extremos: uno de alta salinidad (no identificado directamente) y otro compuesto de agua meteórica diluida. Las aguas de mayor salinidad presentan las mayores concentraciones de  $\text{Li}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ; las menores concentraciones se presentan en el agua de menor salinidad.

Las diferencias en la composición química del agua subterránea se deben a las reacciones de intercambio iónico que se desarrollan en el acuífero: de tipo directo cuando el  $\text{Na}^+$  de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por el  $\text{Ca}^{+2}$  disuelto en el agua subterránea y de tipo inverso cuando el  $\text{Ca}^{+2}$  de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por el  $\text{Na}^+$  contenido en el agua subterránea.

Según el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) para clasificar la calidad del agua destinada al uso agrícola, predominan las aguas de tipo  $\text{S}_2\text{-C}_4$  (contenido media de sodio intercambiable y muy alta salinidad) y  $\text{S}_3\text{-C}_4$  (alto contenido de sodio intercambiable y muy alta salinidad), cuya utilización en la agricultura se restringe a los suelos arenosos con buen drenaje, resistentes a la sodificación, y cultivos tolerantes a la salinidad.

En menor proporción se presentan aguas de tipo  $\text{S}_1\text{-C}_3$ , que presentan bajo contenido de sodio intercambiable y alta salinidad y,  $\text{S}_1\text{-C}_4$  (bajo contenido de sodio intercambiable y muy alta salinidad). Actualmente, la gran mayoría de la zona agrícola riega sus cultivos con agua que presentan concentraciones de STD mayores a 1500 mg/l.

De acuerdo con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en 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, se registran concentraciones mayores a los límites máximos permisibles de sodio, magnesio, cloruros, sulfatos, nitratos y STD.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo más reciente (CONAGUA, DLBCS, 2015), se registró la existencia de 1,083 de aprovechamientos del agua subterránea, la gran mayoría pozos, todos ellos activos. Del total, 711 se destinan al uso agrícola, 334 para uso doméstico pecuario, 34 para uso público-urbano y 4 para uso industrial

El volumen total de extracción asciende a **181.8 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 171.2 hm<sup>3</sup> (94.2 %) se destinan al uso agrícola, 9.3 hm<sup>3</sup> (5.1 %) para abastecimiento de agua potable y 1.3 hm<sup>3</sup> (0.7 %) para uso doméstico-pecuario.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2003-2015, en una superficie de **3,250 km<sup>2</sup>** 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:

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

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:

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

## 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 (Ehd). Adicionalmente, debido a la intrusión marina, existe ingreso de agua salobre (Ehs) 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 ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Ehd:** Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)

**Ehs:** 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:

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

### 7.1.2 Entradas de agua dulce por flujo subterráneo horizontal (Ehd)

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 piedemonte, 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 2015 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

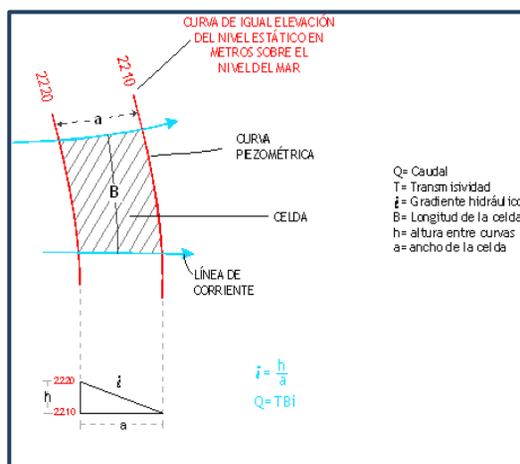
Donde:

**Q**= Gasto;

**T**= Transmisividad;

**B**= Longitud de la celda;

**i**= Gradiente hidráulico;



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 asciende a **36.6 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (2015)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
Ed1	4885	2930	5	0.00171	0.0040	0.03334	1.1
Ed2	7490	975	5	0.00513	0.0030	0.11523	3.6
Ed3	7160	1790	10	0.00559	0.0020	0.08000	2.5
Ed4	8625	1300	10	0.00769	0.0025	0.16587	5.2
Ed5	10580	2440	10	0.00410	0.0035	0.15176	4.8
Ed6	9440	3255	10	0.00307	0.0020	0.05800	1.8
Ed7	8140	2605	10	0.00384	0.0015	0.04687	1.5
Ed8	13510	2280	10	0.00439	0.0015	0.08888	2.8
Ed9	8625	1790	10	0.00559	0.0025	0.12046	3.8
Ed10	6350	2115	10	0.00473	0.0015	0.04504	1.4
Ed11	7000	1625	10	0.00615	0.0015	0.06462	2.0
Ed12	9280	1790	10	0.00559	0.0015	0.07777	2.5
Ed13	7000	1465	10	0.00683	0.0012	0.05734	1.8
Ed14	9115	1870	10	0.00535	0.0012	0.05849	1.8
<b>TOTAL</b>						<b>36.6</b>	

### 7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Ehs)

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 la elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5. El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **7.2 hm<sup>3</sup>/año** (tabla 3).

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (2015)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
Ehs1	13510	1465	5	0.00341	0.0010	0.04611	1.5
Ehs2	10580	2605	5	0.00192	0.0015	0.03046	1.0
Ehs3	7490	2440	5	0.00205	0.0020	0.03070	1.0
Ehs4	7325	3745	5	0.00134	0.0020	0.01956	0.6
Ehs5	7000	2605	5	0.00192	0.0015	0.02015	0.6
Ehs6	13020	2765	5	0.00181	0.0012	0.02825	0.9
Ehs7	8955	2765	5	0.00181	0.0012	0.01943	0.6
Ehs8	7490	3580	5	0.00140	0.0030	0.03138	1.0
<b>TOTAL</b>							<b>7.2</b>

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 (Ri)

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

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo y a que la mayor parte de la zona agrícola se utiliza riego tecnificado, se consideró que un 10 % 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 40 y 60 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 171.2 hm<sup>3</sup> anuales y que un 10% de éste recarga de manera efectiva al acuífero, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 34.2 hm<sup>3</sup> anuales. **Rr = 17.1 hm<sup>3</sup> 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 10% recarga de manera efectiva al acuífero. Si el volumen que se utiliza para uso público-urbano es de 9.3 hm<sup>3</sup> anuales, la recarga por esta fuente es de **0.9 hm<sup>3</sup> 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 = 18.0 hm<sup>3</sup> anuales.**

## **7.2 Salidas**

La descarga del acuífero ocurre principalmente 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 asciende a **181.8 hm<sup>3</sup> 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 = 7.2 hm<sup>3</sup> anuales.**

## **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 2003-2015 (figura 6).

Con base en ella y un valor promedio de rendimiento específico de 0.05, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 3,250 km<sup>2</sup>, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

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

**A**= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)

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

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2003-2015 se pueden observar en la tabla 4.

El volumen del cambio de almacenamiento es de **-35.4 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 4. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2003-2015)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-5	-5	30.1	0.05	-7.5
-10	-10	86.6	0.05	-43.3
-5 a -10	-7.5	426.7	0.05	-160.0
-2 a -5	-3.5	631.6	0.05	-110.5
0 a -2	-1.0	2075.0	0.05	-103.8
<b>TOTAL</b>		<b>3250.0</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-425.1</b>
<b>Promedio anual</b>				<b>-35.4</b>

### 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:

$$R_v = B + S_{sb} \pm \Delta V(S) - E_{hd} - R_i - E_{hs}$$

$$R_v = 181.8 + 7.2 - 35.4 - 36.6 - 18.0 - 7.2$$

$$R_v = 91.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

$$R = R_v + E_{hd} + R_i$$

$$R = 91.8 + 36.6 + 18.0$$

$$R = 146.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

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 **146.4 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 128.4 hm<sup>3</sup> son recarga natural y 18.0 hm<sup>3</sup> recarga incidental.

### 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, no existe descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 hm<sup>3</sup> 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 **176,680,721 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

### 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 146.4 - 0.0 - 176.680721 \\ \text{DMA} &= -30.280721 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **30,280,721 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1996. Actualización del estudio geohidrológico del acuífero del valle de Santo Domingo, B.C.S. Realizado por Desarrollo y Sistemas, S.A.