



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTA CATARINA (0231), ESTADO
DE BAJA CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	4
3.1 Provincia fisiográfica	4
3.2 Clima	5
3.3 Hidrografía.....	5
3.4 Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía	7
4.2 Geología estructural	9
4.3 Geología del subsuelo.....	9
5. HIDROGEOLOGÍA.....	10
5.1 Tipo de acuífero.....	10
5.2 Parámetros hidráulicos	10
5.3 Piezometría.....	11
5.4 Comportamiento hidráulico.....	11
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	11
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	15
7.1 Entradas.....	15
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	16
7.1.2 Entradas por flujo horizontal (Eh)	16
7.2 Salidas	17
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	17
7.2.2 Bombeo (B)	19
7.2.3 Salidas Subterráneas (Sh)	19
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	20
8. DISPONIBILIDAD	20
8.1 Recarga total media anual (R).....	21
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	21
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	21
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
9. BIBLIOGRAFÍA	23

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 Santa Catarina, definido con la clave 0231 por la Comisión Nacional del Agua, se encuentra ubicado en la porción Central del estado de Baja California, en la zona costera del Océano Pacífico, sus colindancias son: limitado al norte por el acuífero de San Fernando San Agustín, al sur y oeste con el Océano Pacífico, al este con el acuífero de Punta Canoas-San José; comprendida entre los paralelos 29° 25' y 29° 54' de latitud norte y entre los meridianos 114° 58' y 115° 32' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich; su extensión es aproximadamente de 1,749 km².

Geopolíticamente se encuentra ubicado en el municipio de Ensenada.

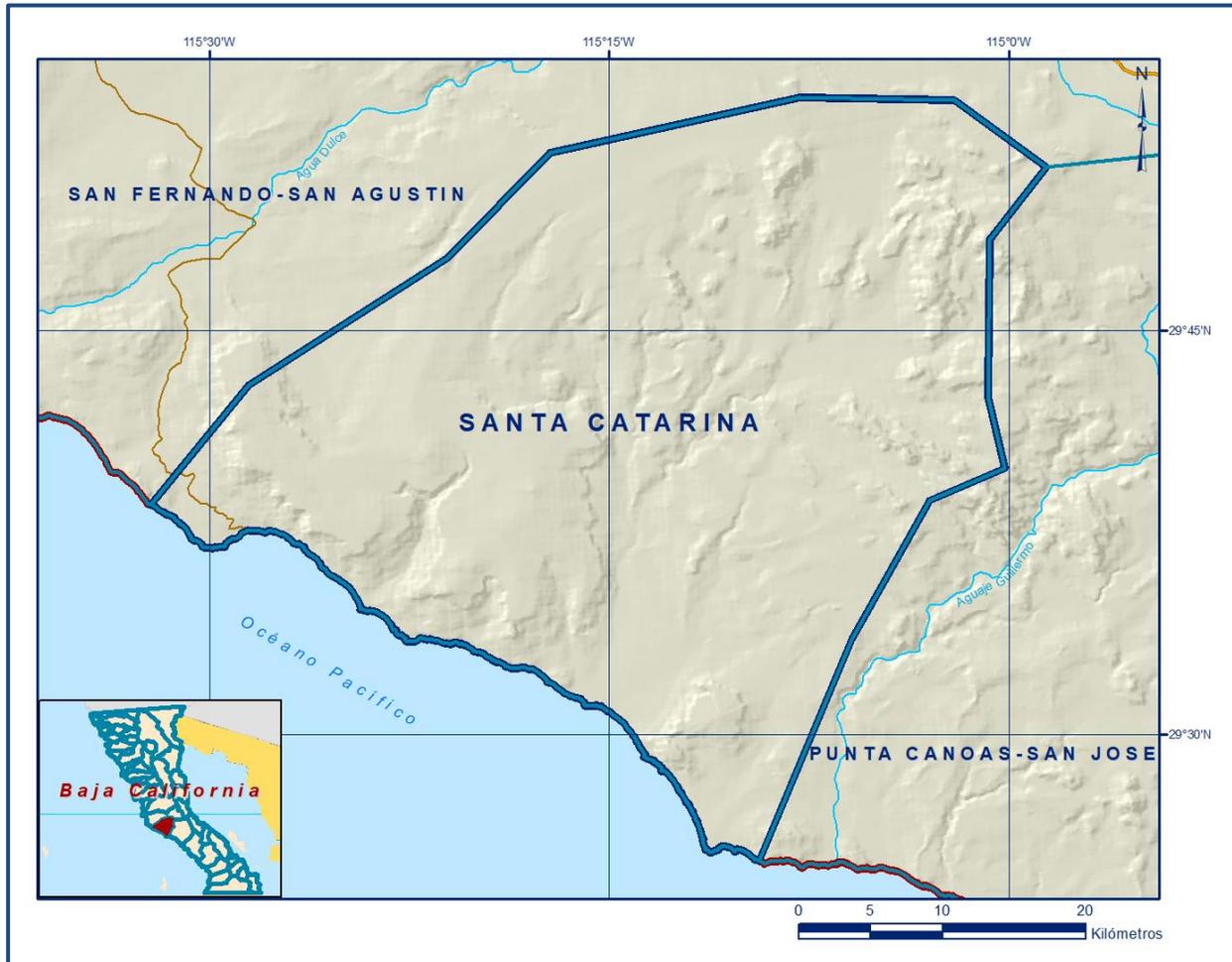


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la Poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0231 SANTA CATARINA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	0	46.9	29	42	319	
2	115	0	9.3	29	39	53.7	
3	115	2	58.8	29	38	40.5	
4	115	5	53.8	29	33	32.9	
5	115	9	23.6	29	25	18.5	DEL 5 AL 6 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
6	115	32	14.8	29	38	318	
7	115	28	33.3	29	42	58.6	
8	115	21	3.5	29	47	42.1	
9	115	17	13.8	29	51	34.7	
10	115	7	50.4	29	53	39.4	
11	115	2	2.7	29	53	33.4	
12	114	58	35.0	29	51	3.9	
13	115	0	43.0	29	48	22.3	
1	115	0	46.9	29	42	319	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Bahía de San Luís Gonzaga pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California” y su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 15 de mayo de 1965. Clasificado como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. Así mismo, el acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica 4, Península de Baja California centro-oeste.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área en este caso para el acuífero Santa Catarina, no cuenta con registros de trabajos previos realizados.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área del acuífero corresponde a la Provincia Fisiográfica de las Sierras de Baja California, Subprovincia de la Sierra Volcánica (Manuel Álvarez Jr.), localmente se caracteriza por mostrar un relieve abrupto conformado por sierras de distribución irregular, con elevaciones que llegan a más de 1000 msnm. Dentro de las principales elevaciones se pueden citar:

La mesa El Mármol, que se encuentra cubierta por basaltos de color negro que sobreyacen a rocas sedimentarias formadas por areniscas en general entre 100 y 200 m del piso de las partes más bajas ocupadas por los cañones San Fernando y San Vicente. En este extremo se encuentran también algunas mesetas alargadas formadas por tobas riolíticas. Los cerros San Fernando, San Pedro y San Pablo, se encuentran coronadas por rocas granodioríticas; conjuntamente forman un amplio cuerpo de rocas intrusivas fracturadas.

El cerro Santa Teresa, es ocupado por pórfidos riódacíticos y rocas granodioríticas. La mesa San Carlos, ocupa la mayor extensión de afloramiento de las rocas basálticas del área.

3.2 Clima

De acuerdo al sistema de clasificación climatológica de Köppen, modificado por E. García (1964) para adaptarlo a las condiciones climáticas de la República Mexicana, se tiene que el área del acuífero presenta a nivel regional, las variantes que se describen a continuación: Tipos de climas muy secos BW (con lluvias en verano, invierno y escasas todo el año).

BW_{hs}: Muy árido a semicálido, con temperatura media anual entre 18 y 22° C la temperatura del mes más frío es menor a 18° C y la temperatura del mes más caliente mayor de 22° C; el régimen de lluvias de invierno y precipitación invernal son mayor al 36% del total anual.

BW_{ks}: Muy árido, temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C, temperatura del mes más caliente menor de 22° C; lluvias de invierno y porcentaje de lluvia invernal mayor al 36% del total anual. En el periodo de observación de 1978-1980 de la estación 046 Santa Catarina Sur, se registró una precipitación media anual de 78.842 mm y una temperatura media anual de 19° C.

3.3 Hidrografía

Todos los arroyos que existen dentro del acuífero Santa Catarina son de régimen intermitente, es decir, sólo conducen agua durante el período de lluvias o en época de ciclones, cuando perturbaciones de este tipo pasan por la península.

El área del acuífero es de 1,749.04 km², y está formado por las siguientes subcuencas: Río Santa Catarina con una superficie de 1,082.08 km², BCN-4 con 285.76 km², El Cañoncito con 232.97 km², Puerto Canoas con 148.23 km², así como una parte de las subcuencas de San Fernando y Puerto San Carlos y Puerto Nuevo.

La corriente principal de la cuenca, es el arroyo La Bocana, que tiene su origen en el cerro La Aguatosa a 1,349 msnm, de este lugar hasta el poblado Santa Inés, presenta un rumbo al sureste, durante su trayectoria recibe varios afluentes de poca importancia; siguiendo con dirección suroeste-oeste, la corriente pasa por las localidades de San Luisito y Bocana, aquí recibe al efluente importante por la margen derecha denominado arroyo Mesa Prieta.

Posteriormente sigue su curso hasta desembocar en el puerto Canoas, con pendiente media 0.02% y un recorrido total de 76.125 km, otra corriente importante en la cual en la cual se puede hacer mención es el Arroyo Santa Catarina, que recorre 50 km en sentido Norte-Sur, hasta desembocar en el Océano Pacífico. El empleo primordial del agua superficial es para el uso pecuario y doméstico. Considerando las características de la cuenca, se evaluó un coeficiente de escurrimiento de 4.44% de un volumen medio anual precipitado de 809.61 millones de m³, que relacionado con el coeficiente determina un volumen drenado de 36.018 Mm³ anuales.

3.4 Geomorfología

Se presenta un relieve irregular en el que se observan pendientes que varían entre el 38% y 20% de inclinación, con un contraste topográfico de suave a sinuoso. La sierra de San Pedro Mártir está formada por cuerpos intrusivos de composición ácida al igual que el Batolito Peninsular, dando origen a prominencias topográficas.

A lo largo del arroyo Santa Catarina hay existe la presencia de areniscas de grano medio a grueso así como también se observan estratos de 20 a 30 cm de conglomerados cementados con arenas, hacia la zona de costa se logran observar terrazas aluviales; las cuales presentan espesores mayores en la porción central del arroyo que en la margen izquierda, con espesores de 8 a 10 m y los menores espesores se localizan al noreste del arroyo, aguas arriba, con espesores de 80 cm a 2 m; las terrazas actúan como fronteras laterales dejando que la descarga del agua subterránea sea a través de un canal estrecho.

4. GEOLOGÍA

El acuífero está constituido principalmente por rocas ígneas extrusivas y sedimentarias (figura 2). Su origen ha dado como resultado la formación de diferentes unidades geológicas, las cuales están constituidas por conglomerados, areniscas y lutitas, areniscas de material carbonoso (presentes en capas delgadas que van de los 5 a 20 cm) a lo largo del arroyo y los cuales pertenecen a la formación El Rosario.

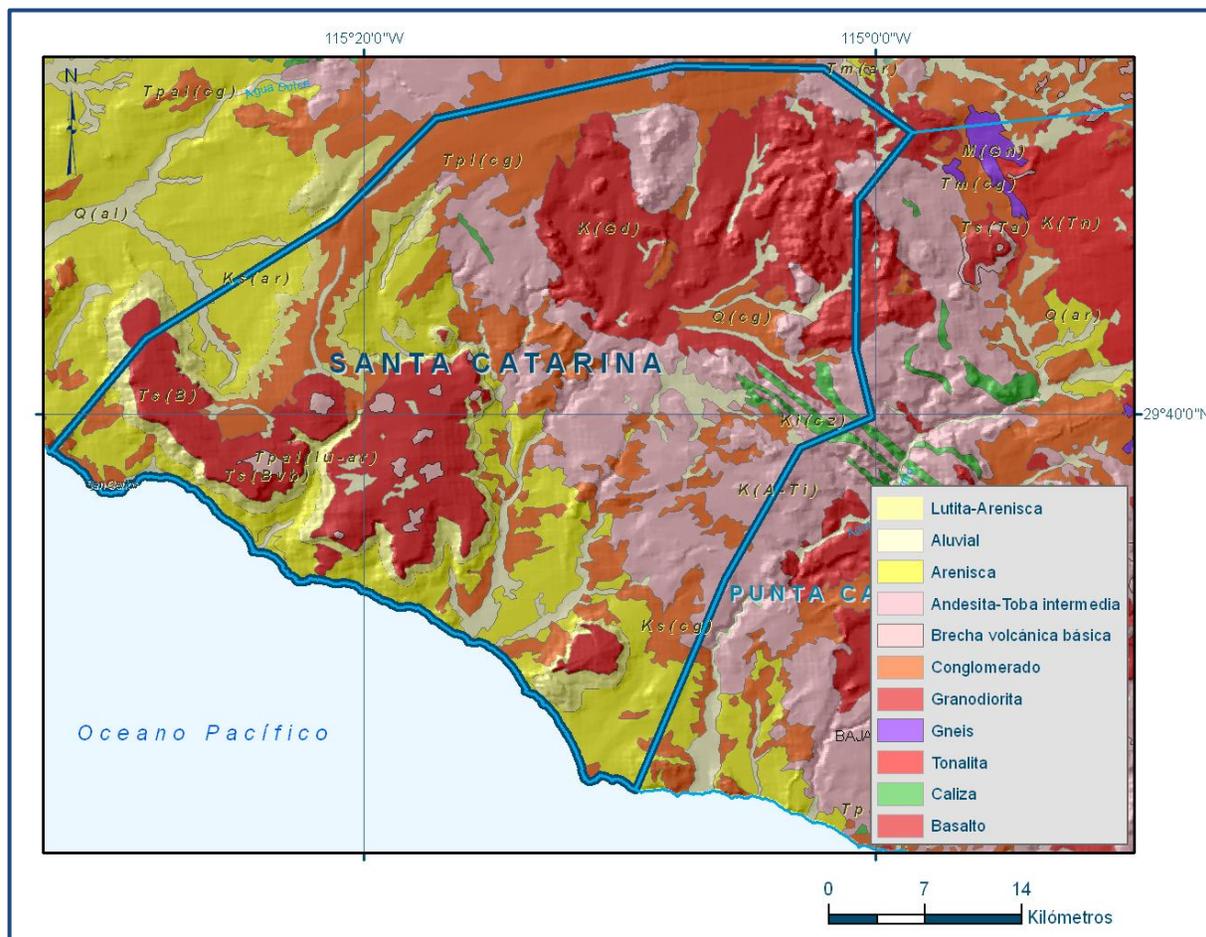


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Formación Rosario (Kr): constituida por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados poco consolidados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación aflora en la parte central del arroyo, descansa en discordancia angular sobre la Formación Alisitos.

Formación Sepultura (Kr-Tr): Es un conjunto de areniscas y conglomerados de origen marino en su base y de tipo continental en la cima.

La parte inferior está en contacto con la Formación Rosario de manera concordante y transicional. Su espesor es de 400 m aproximadamente, su edad va del Eoceno Inferior al Paleoceno. Morfológicamente forma lomeríos suaves de poca altura. Se encuentra distribuida en la porción noroccidental y occidental de la península.

Formación Alisitos (Kas, Kav): constituida por una serie de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias; las rocas volcánicas tienen una composición dacítica-andesítica; las rocas sedimentarias son producto de la denudación de las rocas volcánicas y vulcanoclásticas.

Esta formación está afectada por el proceso de dinamometamorfismo, el cual disminuye de este a oeste. Correspondiente al Paleógeno. La presencia de esta formación se observa en las partes altas que circundan al valle.

Formación Zamora y el Volcán (PopE-F-Mar): Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos estratotectónicos El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos. El Terreno Cortés se distribuye en la porción oriental de la Península de Baja California, donde afloran las rocas más antiguas que conforman el basamento, representadas por las formaciones Zamora y El Volcán que están constituidas por rocas metasedimentarias, compuestas por esquisto, gneis, filita, pizarra, mármol, cuarcita, caliza y hornfels que presentan grados de metamorfismo en facies de esquistos verdes a facies de anfibolitas.

La formación El Volcán sobreyace concordantemente a la formación Zamora y ambas afloran en la porción sureste de la Península de Baja California. Las rocas de estas formaciones se correlación con la secuencia paleozoica que aflora en la Sierra Las Pintas, asignada al Carbonífero por la presencia de crinoides, corales, bivalvos y braquiópodos.

Formación El Indio (TRiMS): La conforma una secuencia metasedimentaria que sobreyace discordantemente a la Formación Zamora y El Volcán, y está constituida por esquistos, filitas, metaconglomerados, calizas, areniscas, pizarras y mármol que afloran al norte de la mesa El Mármol, en el límite nor-noreste del acuífero.

Aluvial (Qal): **Aluvial (Qal):** Está constituido por cantos rodados de materiales preexistentes de origen volcánico, tobas y lavas, estos depósitos son resultado de la erosión de la roca madre de origen Ígneo que constituye la Formación Comondú; presentan una edad Pleistoceno conforme a su posición estratigráfica y a la presencia de fauna marina (pleistocénica en los litorales del Golfo de California), constituye las vegas de los arroyos con una alta permeabilidad, representa la unidad principal de recarga al acuífero.

Unidad Eólica (Qhoal): Integrada por arena de grano fino a medio, se encuentran bien redondeadas y clasificadas. Derivada de rocas ígneas y metamórficas, presenta además, minerales y fragmentos de moluscos, expuestos en las zonas costeras y en algunos valles presentando escasos metros de espesor. Forma dunas arregladas paralelamente a la línea de costa.

Fluvial (Qfl): Son suelos residuales, aluviones, gravas, arenas, limos, tobas y conglomerados volcánicos que sufrieron posteriormente descomposición química. Constituye los cauces y arroyos en los que se presenta una alta infiltración por sus características altamente permeables.

4.2 Geología estructural

Las estructuras que afectan las unidades litológicas son principalmente: fracturamiento, fallamiento y plegamiento en rocas sedimentarias. Las fallas son principalmente de tipo normal, cuya representación fisiográfica es la sierra de San Pedro Mártir; existen algunas fallas de desplazamiento horizontal, representada por el cañón San Fernando. De acuerdo con las rocas que son afectadas por el fallamiento, se considera que las estructuras son de edad pre-miocénica, con sentidos de movimiento horizontal (izquierdo) para el primer sistema de esfuerzos y de tipo vertical (normal), principalmente para el sistema post-miocénico.

4.3 Geología del subsuelo

Debido a que el acuífero no cuenta con información, se delimitaron las unidades hidroestratigráficas de acuerdo al recorrido de campo que se realizó a lo largo del acuífero, y comparándolo en ocasiones con los acuíferos cercanos que presentan características similares. Se obtuvieron 3 unidades geohidrológicas que de la base a la cima están agrupadas como:

Unidad Impermeable: representada por rocas ígneas como gabro, granito y rocas volcánicas plutónicas, así como por rocas sedimentarias como areniscas y lutitas de la Formación Rosario, dicha formación se localiza en las partes altas de la cuenca en las sierras que circundan al valle limitándose lateralmente y a profundidad.

Unidad Semipermeable: la constituyen conglomerados poco consolidados, depósitos fluviales y rocas volcánicas extrusivas del Paleógeno-Neógeno de origen continental y por conglomerados de la formación Rosario.

Debido a su distribución localizada principalmente al oriente en la parte alta de la cuenca, se reduce su importancia geohidrológica.

Unidad Permeable: está constituida por depósitos granulares del Cuaternario, integrado por gravas, arenas y material arcillo-arenoso originados por la erosión de formaciones preexistentes, transportadas de las partes altas de la cuenca, por las corrientes a las zonas topográficamente bajas, en las que se ubican las áreas de explotación.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero está formado en los depósitos granulares de origen aluvial que constituyen el relleno del valle. Se trata de un acuífero libre integrado por un medio conformado por los depósitos granulares no consolidados, arenas, gravas y material arcillo-arenosos de porosidad primaria y por un medio fracturado constituido por rocas ígneas como gabro y basalto fracturados y fallados. Se observan como una serie de horizontes de permeabilidad variable, todos éstos con diferentes espesores y continuidad lateral.

El acuífero está limitado a profundidad y lateralmente por la presencia de rocas ígneas intrusivas que funcionan como basamento impermeable, que favorecen el escurrimiento superficial hacia zonas de mayor permeabilidad a través del cual se infiltra.

5.2 Parámetros hidráulicos

Debido a que en el acuífero no se han ejecutado pruebas para determinar sus propiedades hidráulicas, no se conocen los valores de los parámetros hidrodinámicos.

Sin embargo por correlación hidrogeológica, se considera que son similares a las de los acuíferos vecinos, dentro del estado de Baja California, ya que presentan características geológicas e hidrogeológicas similares.

Tomando en consideración lo anterior para este acuífero se utilizaron los datos generados en la perforación exploratoria de los pozos (PBCER-1 y PBCER-2) localizados en el acuífero El Rosario:

Tabla 2. Estimación de Parámetros Hidráulicos

PBCR-1		PBCR-2	
NE (m)	16.28	NE (m)	15
ND (m)	29.15	ND (m)	21.58
Q (lps)	5	Q (lps)	36
B (m)	28	B (m)	31

K(m/s) promedio	T(cm²/s) promedio
(PBCR-1) 1.39×10^{-4}	(PBCR-1) 6.94×10^{-3}
(PBCR-2) 9.25×10^{-5}	(PBCR-2) 9.26×10^{-3}

5.3 Piezometría

En la zona no existe historial piezométrico de los aprovechamientos existentes por lo que se tomará en cuenta la información piezométrica que se obtuvo del recorrido realizado en el mes de diciembre del 2008 para de este modo observar el comportamiento actual del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático.

De acuerdo a la configuración realizada con datos del 2008 se observa que la profundidad varía entre 0.10 y 4 m para la parte central del acuífero donde se encuentra la comunidad de Santa Catarina, mientras que para la zona costera las profundidades van de 7 a 20 m por lo que se consideró necesario evaluar diferentes áreas de explotación en el acuífero, además de que estructuralmente estos no se encuentran comunicados (figuras 3 Y 4).

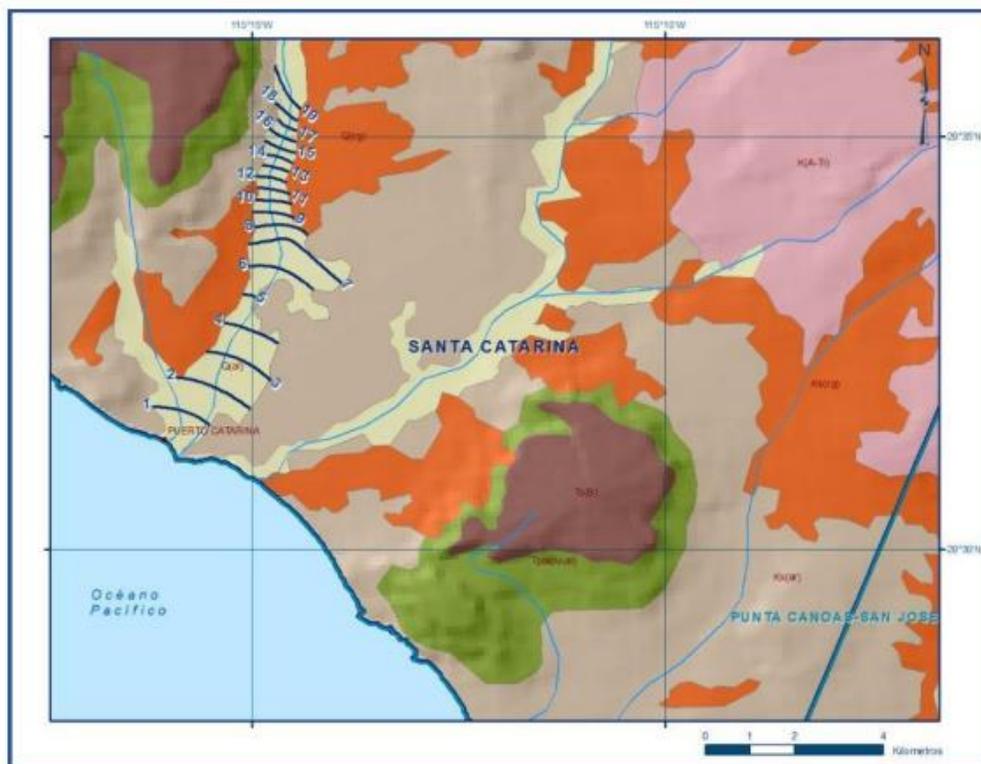


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m, área de explotación 1, (2008)

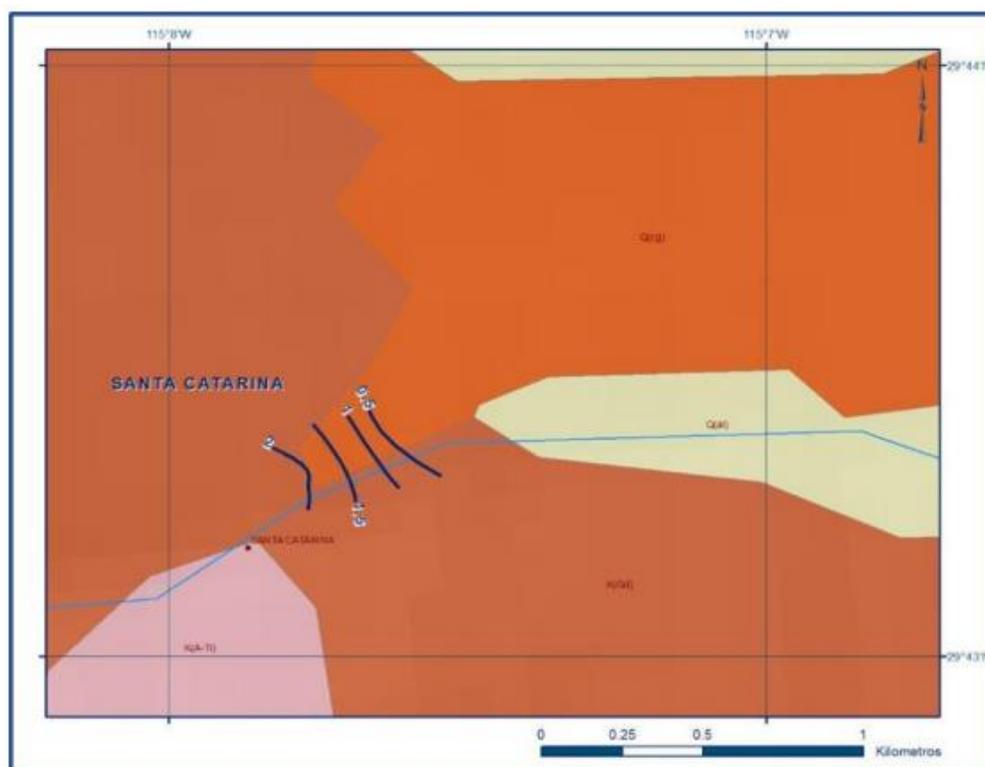


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m, área de explotación 2, (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para el área de explotación 1 que queda comprendida en la parte central del acuífero y donde se localiza la comunidad de Santa Catarina, la elevación del nivel estático se manifiesta de manera decreciente es decir el agua circula de la cota de elevación más alta a la más baja disminuyendo de forma gradual y observándose manifestaciones superficiales del agua, la dirección del flujo de agua es con sentido este-oeste (E-W), para el área de explotación 2 localizada hacia la zona de costa cercana a Punta San José aunque el flujo de agua disminuye también de forma gradual aquí no se observan manifestaciones superficiales del agua, la cual presenta una dirección de flujo con sentido hacia el suroeste (SW) descargando hacia el océano pacífico (figura 5 y 6).

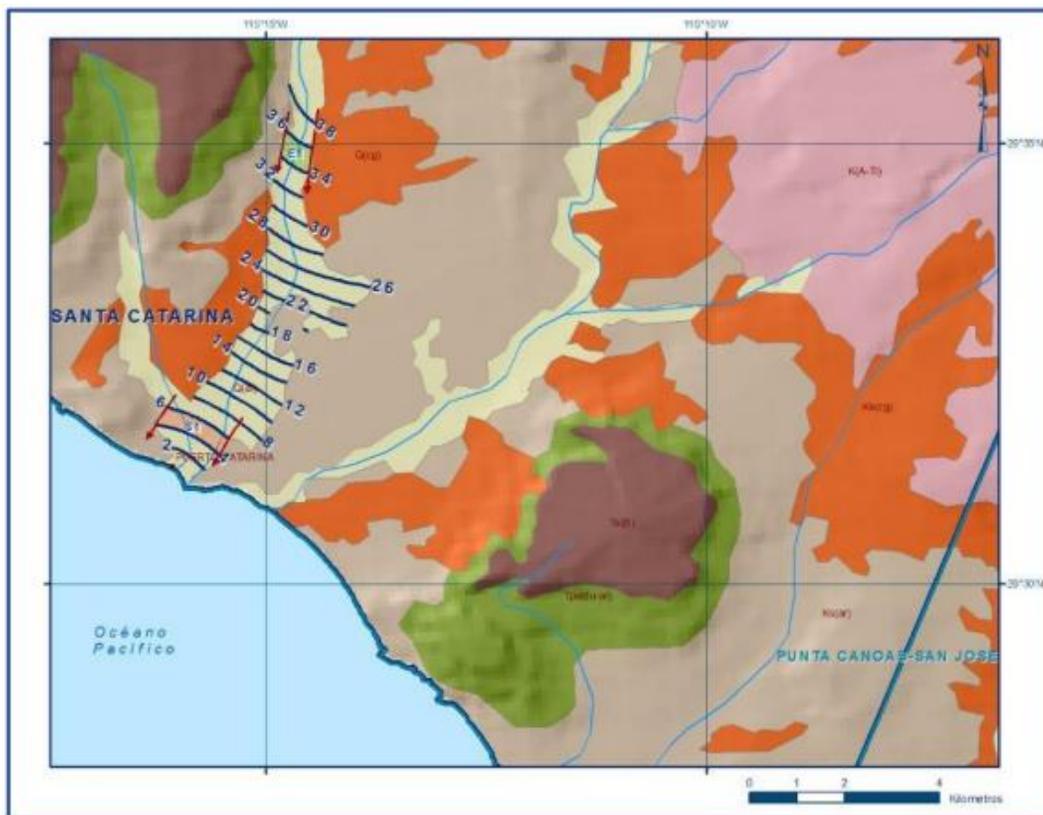


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm, área de explotación 1, (2008)

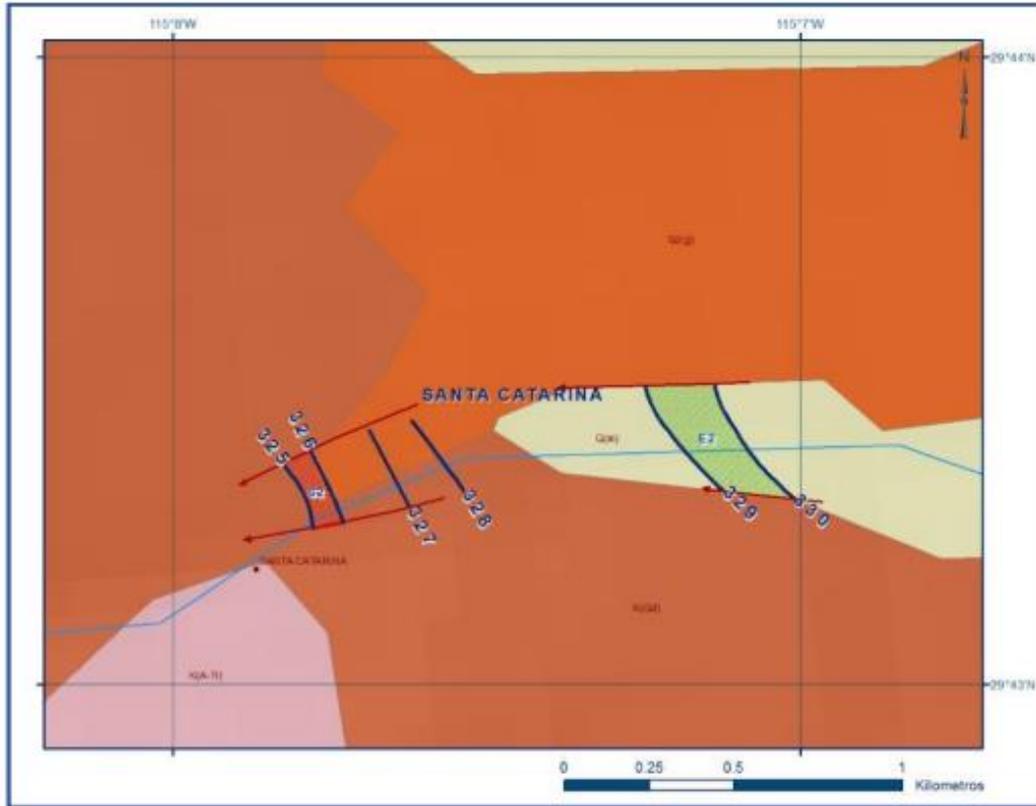


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm, área de explotación 2, (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Debido a que no existe información anterior, se infiere que el nivel estático se mantiene en equilibrio.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo a los datos tomados en el recorrido de campo, junto con la piezometría, se pudieron tomar también datos de temperatura ($T = ^\circ\text{C}$), Conductividad Eléctrica ($\text{CE} = \Delta\text{s}$), de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados Área de Explotación 1 CE de 2.70 e n los aprovechamientos localizados en el área, con una temperatura de 22.8°C , considerando que la cantidad de sólidos totales disueltos es de 1728 partes por millón aproximadamente, la cantidad de sales en esta zona se debe a que hay disolución de minerales como el carbonato de calcio (caliche) que en esta zona es muy susceptible a disolverse ya que está localizado en las fracturas por donde circula el agua, haciéndose más notorio hacia la zona costera Área de explotación 2, donde la CE varía de 3.29 a 5.74, ya que los aprovechamientos están localizados sobre material aluvial con un alto contenido en carbonatos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

El REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) manifiesta la existencia de 4 aprovechamientos, de los cuales 2 se encuentran en el área de explotación 1, y los otros 2 en el área de explotación 2, áreas consideradas para el balance; tomando en cuenta los datos respecto al volumen concesionado dentro del acuífero Santa Catarina se obtuvo que el 20.18% (0.0012 hm³) es para uso pecuario, 13.03% (0.0008 hm³) para doméstico y el 66.79% (0.0042 hm³) para uso público urbano siendo este el de mayor consumo, y dando como resultado una extracción total de 6.3 hm³ de agua.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó únicamente para el año 2008, en una superficie de 11.38 km² dividida en área de explotación 1 de 10.85 km² y área de explotación 2 de 0.53 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 se expresa como:

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

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

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

7.1 Entradas

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

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

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 (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga Vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del 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.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2008, mostrada en las figuras 5 y 6. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

Q = Gasto que pasa por un determinado canal de flujo;

T = Transmisividad;

B = Largo de la celda;

i = Gradiente hidráulico

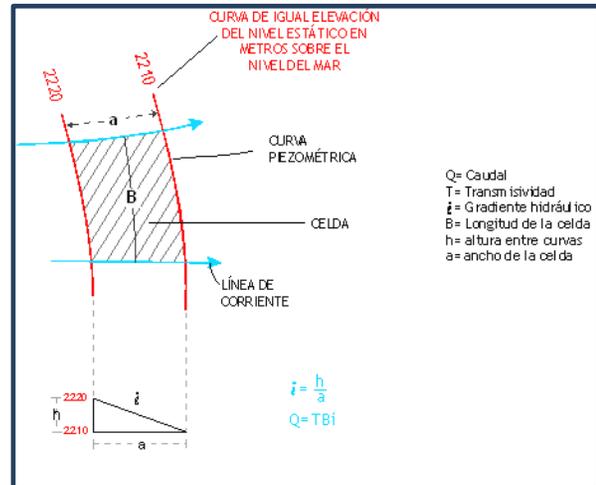


Tabla 3. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008 Área de explotación 1

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	Longitud B (m)	i	Caudal Q (m^3/s)	Volumen anual (hm^3)
E1	6.481	605	0.00375	0.0147	0.464

Tabla 4. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008 Área de explotación 2

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	Longitud B (m)	i	Caudal Q (m^3/s)	Volumen anual (hm^3)
E1	7.292	360	0.00115	0.0030	0.095

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 para el área de explotación 1 es de 0.46 hm^3 mientras que para el área de explotación 2 se obtuvo un volumen de 0.10 hm^3 (Tabla 3 y 4) con un total de **0.56 hm^3** en el total del acuífero.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y la evapotranspiración (ET).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Esta componente está representada por la descarga de una unidad hidrogeológica a la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación.

Para su cuantificación se utilizó la relación empírica de Gardner y Fireman (1958), la cual determina la tasa máxima de evaporación, a partir de las propiedades hidráulicas del medio y su granulometría. Su expresión matemática es:

$$E = K_s \left[\frac{-a\pi}{LN(\text{sen}(\pi / N))} \right]^N$$

Donde:

K_s= Conductividad Hidráulica a Saturación (cm/día).

a y **N**= Parámetros que representan la forma del suelo. Donde a se expresa en (cm), mientras que N se considera adimensional. (adim).

L= Profundidad (cm).

El área, presenta una granulometría que varía de media a gruesa, predominando el material grueso y algunos cantos rodados arrastrados a lo largo del arroyo. En la parte sureste del Valle es más abundante la cantidad de material grueso, mientras que en la parte central hay mayor concentración de material medio. Los parámetros a y N seleccionados de acuerdo a las características descritas arriba, son de a = -17 cm y N = 3.8, mientras que K_s = 37 cm/día. Con estos parámetros se construye la gráfica para la relación tasa máxima de evaporación-profundidad de influencia figura 7.

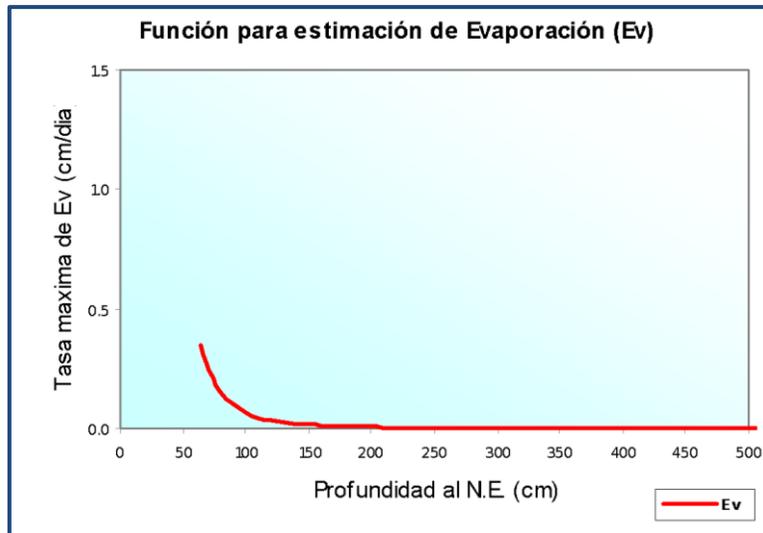


Figura 7. Relación de la tasa máxima de evaporación y profundidad de influencia

Tabla 5. Volumen de evapotranspiración de acuerdo al área

Prof. media al nivel estático (cm)	Area (km ²)	Tasa de evap. (mm/día)	Volumen de evap (hm ³)
Área de explotación 1			
100	0.8	0.69	0.2
200	1.38	0.05	0.02
300	1.29	0.01	0
Área de explotación 2			
100	0.1	0.69	0.03
200	0.5	0.05	0.01
300	0.5	0.01	0

El valor estimado de volumen para este componente, para el año 2008 fue de 0.23 hm³/año para el área de explotación 1 y para el área de explotación 2 fue de 0.04 hm³/año (Tabla 5). Con estos valores se obtuvo un volumen por evapotranspiración (ET) de **0.27 hm³**.

7.2.2 Bombeo (B)

Este componente se determinó de acuerdo al volumen reportado por el Registro Público de derechos de Agua (REPDA). Para el año de balance se determinó una extracción por bombeo de **0.0 hm³/año**.

7.2.3 Salidas Subterráneas (Sh)

Para calcular el volumen que se descarga naturalmente del área de balance por flujo subterráneo, se consideraron los parámetros hidráulicos del mismo y las configuraciones; el acuífero Santa Catarina es un acuífero costero, por lo que en él existe una descarga de flujo subterráneo hacia el Océano Pacífico (Tabla 6 y 7).

Tabla 6. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008, Área de explotación 1

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (m)	i	Caudal Q (m ³ /s)	Volumen anual (hm ³)
S1	2.083	1,285	0.0047	0.0126	0.399

Tabla 7. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008, Área de explotación 2

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	Longitud B (m)	i	Caudal Q (m^3 / s)	Volumen anual (hm^3)
S1	1.389	250	0.0078	0.0022	0.070

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) es de **0.47 hm^3** .

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

El cambio de almacenamiento se estima a partir de las evoluciones de los niveles estáticos como un mínimo se deben considerar dos años en este caso se considera nulo.

Solución a 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:

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

$$R_v = 0.47 + 0.0 + 0.27 - 0.00 - 0.56$$

$$R_v = 0.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, y las entradas horizontales subterráneas.

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.1 + 0.56$$

$$R = 0.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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. Para este caso, su valor es de **0.7 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 este caso, su valor de **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 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 **470,139 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 0.7 - 0.0 - 0.470139 \\ \text{DMA} &= 0.229861 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **229,861 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2007. Estadísticas del Agua en México. CONAGUA. México.

INEGI, 995. Estudio Hidrológico del Estado de Baja California. INEGI. Gobierno del Estado de Baja California. Aguascalientes, Ags. México. 1er impresión. 1