CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Bahía de San Luis Gonzaga (0225), 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 5
3.1 Provincia fisiográfica 5
3.2 Clima 5
3.3 Hidrografía 6
3.4 Geomorfología 6
4. GEOLOGÍA 7
4.1 Estratigrafía 8
4.2 Geología estructural 10
4.3 Geología del subsuelo 10
5. HIDROGEOLOGÍA 11
5.1 Tipo de acuífero 11
5.2 Parámetros hidráulicos 12
5.3 Piezometría 12
5.4 Comportamiento hidráulico 13
5.4.1 Profundidad al nivel estático 13
5.4.2 Elevación del nivel estático 14
5.4.3 Evolución del nivel estático 15
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 18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR) 18
7.2.2 Bombeo (B) 18
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 18
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 19
8. DISPONIBILIDAD 20
8.1 Recarga total media anual (R) 20
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM) 20
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 21
8.4 Disponibilidad de aguas Subterráneas (DAS) 21
9. BIBLIOGRAFÍA 22

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 Bahía de San Luis Gonzaga, definido con la clave 0225 por la Comisión Nacional del Agua, entre las coordenadas geográficas 29°25' a 30°05' de latitud norte y de 114° 12' a 114°40' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 723.76 km^2. Colinda al noroeste con el acuífero El Huerfanito, al este con Punta Canoas-San José, al sur y suroeste con Calamajue y Laguna de Chapala respectivamente y al nornoreste con el Mar de Cortés (figura 1).

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 Bahía de San Luís Gonzaga

ACUIFERO 0225 BAHIA DE SAN LUIS GONZAGA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	13	49.3	29	41	43.1	
2	114	15	32.7	29	39	18.0	
3	114	14	12.3	29	36	6.8	
4	114	16	47.6	29	30	26.1	
5	114	15	45.3	29	26	40.1	
6	114	18	0.0	29	25	7.3	
7	114	26	32.0	29	34	25.0	
8	114	30	7.8	29	35	26.8	
9	114	31	20.1	29	39	45.4	
10	114	36	18.6	29	49	46.2	
11	114	38	7.9	29	52	212	
12	114	39	44.7	29	55	8.7	
13	114	33	516	30	0	48.5	DEL 13 AL 14 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
14	114	11	26.8	29	43	14.3	
1	114	13	49.3	29	41	43.1	

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. El usuario principal de agua subterránea es el doméstico. Dentro de su territorio no existe Distrito o Unidad de Riego alguna ni se ha constituido a la fecha en Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

APRECIACIÓN PRELIMINAR DE LAS CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE BAHÍA DE SAN LUIS GONZAGA EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, REALIZADO EN DICIEMBRE DE 1975 POR LA EMPRESA TÉCNICAS MODERNAS DE INGENIERÍA, S.A. En el estudio se realizaron actividades como: censo y distribución de los aprovechamientos existentes, reconocimientos geológicos de campo, determinación de la calidad del agua subterránea y su relación con las formaciones geológicas, así como el análisis climatológico con respecto a la precipitación.

Se reporta que para el periodo 1956-1973 existe una precipitación media anual de 94.8 mm. La temperatura media anual para esa época es de 19° C, la evaporación media anual en esta zona es de 2,047.6 mm.

REGISTRO DE PERFORACIÓN, AFORO Y EQUIPAMIENTO DE 2 POZOS, EL BC-1711 Y EL BC-1712 UBICADOS EN EL RANCHO EL POZO. EN MARZO DE 1977. Estos estudios muestran que el nivel estático para esta época en la zona es de 10.37 m. El pozo BC-1711 tiene una profundidad total de 11 m y ambos presentan un gasto de 2 lps.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se encuentra localizado dentro de la Provincia Fisiográfica Sierras de Baja California, Subprovincia de la Sierra Cristalina de Baja California (Manuel Álvarez Jr.).

El 74% de su superficie 523 km^2 se encuentra formada de rocas ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas que constituyen las sierras que bordean la cuenca y cuya elevación máxima es de 100 m, se encuentra en el borde Occidental donde se localiza la Sierra Santa Isabel.

El 26% restante 182,76 km^2 lo forman materiales no consolidados que constituyen la planicie aluvial, fluvial, terrazas erosionadas cuya elevación máxima es de 200 msnm y depósitos eólicos.

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 presenta a nivel regional las variantes se describen a continuación:

Tipos de climas muy secos BW (con lluvias en verano, invierno y escasas todo el año) Subtipos muy secos, muy cálidos y cálidos: BW (h') hw (x') con temperatura media anual entre 18 y 22° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más caliente mayor de 22° C, lluvias repartidas todo el año. Subtipos muy secos cálidos: BWKw (x'). Subtipos muy secos semicálidos: BWhw (x')

La estación climatológica más cercana al área de balance es la 041-San Luis Gonzaga, sin embargo, esta no está operando, por ello los datos de precipitación se tomaron de la estación 132-Agua de Chale ubicado en el acuífero de Matomí-Puertecitos, cuyas características climáticas son semejantes al acuífero Bahía de San Luís Gonzaga.

El acuífero presenta una precipitación anual muy variable para el periodo 1982-2007, la precipitación media anual es de 72 mm, el año que se registró la mayor precipitación total anual fue en 1997 con un valor de 279.5 mm, en tanto que el año en que se registró la menor precipitación total anual fue en 1989 con un valor del orden de los 18 mm.

La estación climatológica de Agua de Chale, para el periodo de 1982-2007 indica una temperatura media anual de 23° C, el mes de agosto es el más caluroso con una temperatura promedio de 31.6° C y el más frío es enero con 15.1° C.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra localizado dentro de la Región Hidrológica 5, denominada Baja California Centro-Este. La cuenca hidrológica de San Luís Gonzaga está delimitada por la Sierra de Columbia al Suroeste, por la Sierra de Calamajué y San Luís hacia el Suroeste y al Noreste de la Bahía se encuentra localizada la Isla San Luís, el tipo de drenaje que se presenta en la zona es de tipo Subparalelo con dirección hacia el Este y Noreste. El orden de sus tributarios es de 1er y 2do orden todos ellos de tipo intermitente, algunos de estos tienen su origen en los Cerros La Aguatosa y el Cerro Tomás, desde donde recorren una distancia hasta el mar aproximadamente de 18 km en promedio.

3.4 Geomorfología

El paisaje de la zona es representativo de las cuencas de la vertiente del Golfo de California, mostrando un valle aluvial de escaso desarrollo bordeado por costas de marismas y esteros originados por la formación de barras o cordones de arena. Los cierres Oriental y Norte de la Bahía, Punta final y Punta Willard respectivamente son acantilados. El paisaje abrupto de la costa lo complementa una isla San Luís de rocas volcánicas y composición ácida que con la barra arenosa, las Alfonsinas y el macizo volcánico de Punta Willard forman otra pequeña bahía en el extremo Norte de la cuenca.

4. GEOLOGÍA

La zona que comprende el acuífero está constituida por material de tipo granular de composición principalmente de hasta 95% de Cuarzo, producto de la erosión e intemperismo las rocas graníticas que afloran en la zona, así mismo se observa una cantidad importante de micas y anfíboles minerales característicos de este tipo de rocas. En la parte media coexisten materiales de tipo granular mal seleccionados entre los que se observan conglomerados subangulosos con clastos de distintas composiciones, morfológicamente se observan algunas dunas. La zona de recarga está compuesta por montañas de composición granítica sumamente fracturadas, las cuales han sido afectadas por la intrusión de diques de composición ácida, a esta unidad sobreyace una unidad de cuarzo arenitas fracturadas de 7 m de espesor aproximadamente sobre las que descansa una unidad de conglomerados de 3 m aproximadamente de espesor con clastos que van del 1 cm hasta 4 m. En la cima se observan bloques de granito de las unidades anteriores que han sido pulidos y han sobresalido de las formaciones más recientes (figura 2).

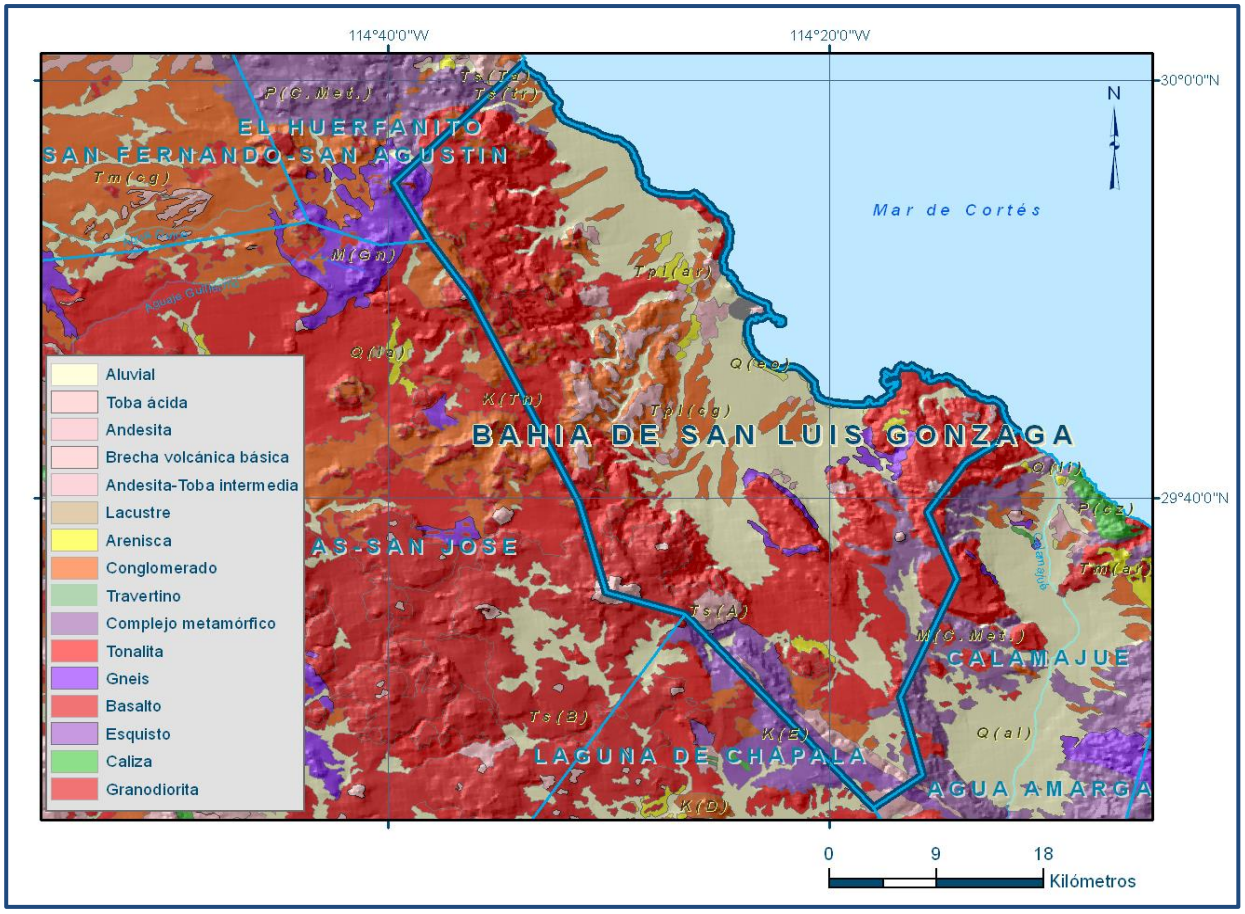

Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que corresponde al acuífero se presenta a continuación describiendo cada uno de sus miembros.

Complejo Metamórfico (Pa). Está constituido por mármoles, esquistos y gneis generados por dinamometamorfismo de alto grado en rocas sedimentarias que provoca una foliación con rumbo de N70°W con 30 o 40 grados de inclinación hacia el NE. Esta unidad representa el basamento regional de la península, con presencia de fósiles en metareniscas y en calizas levemente metamorfoseadas, que sitúan a esta unidad dentro del Mississipico-Pensilvánico. Morfológicamente forma lomeríos de pendiente suave, en ocasiones interrumpidos por pequeños escarpes.

Formación San Hipólito (Tr – Jr): La constituyen una serie de rocas carbonatadas, clásticas y volcánicas que fueron sometidas a un proceso de dinamometamorfismo así como a un proceso de metamorfismo de contacto, dando como resultado filitas, esquistos, skarns y hornfels, la orientación principal de su foliación es Noroeste-Sureste. Esta unidad sedimentaria se atribuye a una secuencia de arco insular. Presenta un espesor de 200 m aproximadamente. Morfológicamente forma cerros de topografía abrupta, a diferencia de la unidad paleozoica y junto con esta forma el cinturón metamórfico prebatolítico, que tiene sus principales afloramientos en las sierras de Juárez y San Pedro Mártir.

Formación Alisitos (Krm): Está constituida por una serie de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias; las primeras de composición andesítica mientras que las rocas sedimentarias están constituidas por la denudación de las rocas volcánicas y volcanoclásticas están afectadas por un proceso de dinamometamorfismo el cual va disminuyendo de oriente a poniente. Se encuentra coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico en forma discordante con un espesor máximo de 5000 m.

Batolito Cretácico de Baja California (Kr): Grupo de cuerpos intrusivos de composición granítico-tonalítica-granodiorítica, que localmente están constituidos por plutones de diorita y gabro. Éstos se encuentran afectando a las formaciones San Hipólito y Alisitos produciendo en estos halos de metamorfismo.

Esta unidad conforma al cinturón batolítico que ha dividido a las rocas del Cretácico y Jurásico como rocas post y pre batolíticas respectivamente.

Formación La Misión (Tr): Esta unidad está constituida por areniscas de grano medio cementadas con calcita, las areniscas son de origen eólico y fluvial, en algunos sitios presentan una estratificación cruzada. Sobreyace en forma concordante a la Formación Sepultura así como en discordancia angular a las rocas paleozoicas y mesozoicas del oriente de la península, con un espesor de 150 m y una edad Mioceno Medio, la morfología que presenta se encuentra sometida por los cuerpos volcánicos que la sobreyacen. Se considera que estos sedimentos son el resultado de las primeras transgresiones marinas producidas por la apertura del Golfo de California.

Unidad Volcánica: Se encuentra representada por rocas piroclásticas de composición ácida, derrames andesíticos y dacíticos, casi todos cubiertos por basaltos plio-cuaternarios. Por su posición dentro de la columna estratigráfica se le ha asignado una edad Mioceno-Plioceno. Su expresión morfológica es de mesetas cortadas que oscilan hacia el oriente, en algunas partes estas mesetas alcanzan grandes alturas.

Formación Imperial (Tr): Compuesta por clastos y carbonatos, como areniscas, conglomerados, y depósitos sedimentarios en estratos delgados, se le ha asignado una edad del Plioceno y forma pequeñas lomas de pendiente suave.

Depósitos Cuaternarios (Qr): Están principalmente constituidos por sedimentos continentales del tipo aluvial y marino de tipo costero, incluso depósitos deltaicos y de llanura de inundación. Sus espesores son muy variados y se les encuentra rellenando valles y zonas bajas en toda la península, aunque sus mayores extensiones se localizan en el noreste de la misma.

Unidad Eólica (Qeo): 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, se encuentran formando dunas arregladas paralelamente a la línea de costa.

4.2 Geología estructural

La emersión del área peninsular durante el Pleistoceno proporcionó en la zona en la actual cuenca Bahía de San Luís Gonzaga, el máximo desarrollo de grandes fallas cuyo desplazamiento se inició en el Mioceno, formando enormes bloques cuya orientación es paralela al Eje Miocénico del Golfo de California.

Este sistema de fallas originó la formación de las Sierras cuyas alturas topográficas mayores corresponden a la de los bloques localizados hacia el occidente y las alturas menores hacia el oriente.

Se realizó trabajo de fotointerpretación en el cual se pudieron determinar los lineamientos existentes correspondientes a posibles fallas y fracturas, para esto se utilizaron cartas topográficas escala 1:50 000, modelos de elevación de la zona además se realizó observación en el recorrido de campo de las estructuras vistas en los modelos y cartas analizadas.

En la zona de recarga, específicamente en los Cerros La Rinconada y Tomás se observa un escarpe de falla normal de dirección N50°W con echado hacia el Sureste. Esto quiere decir que en la zona actuaron esfuerzos distensivos ($\sigma 3$) resultantes con dirección NE-SW teniendo al esfuerzo principal máximo ($\sigma 1$) en posición vertical con dirección NW-SE. Dentro de la cuenca se observan algunas pequeñas mesas de geometría rectangular que se encuentran alargadas con dirección NW-SE.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo a la geología que se presenta en el área se definen tres unidades hidrogeológicas, tomando en cuenta las características de permeabilidad y composición de cada una de ellas.

Unidad permeable: Esta unidad la constituyen depósitos sedimentarios aluviales integrados por arenas de diferente granulometría, gravas y gravillas, se caracterizan por tener una elevada permeabilidad.

Se consideran las acumulaciones pie de monte y fluviales que integran material grueso, arenas gruesas y arcillas, además se tienen depósitos eólicos y areniscas, por su exposición reducida no tienen gran importancia hidrogeológica.

Unidad Semipermeable: La unidad volcánica está representada por tobas de composición ácida, andesítica y basaltos por su intenso fracturamiento adquieren una permeabilidad secundaria, pero por su alta posición estratigráfica funcionan como transmisoras de agua a formaciones subyacentes, en esta unidad se agrupan los conglomerados que presentan una composición de rocas ígneas intrusivas-metamórficas y volcánicas cubriendo espacios aislados por lo que se reduce su grado de interés.

Unidad Impermeable: Dentro de esta unidad se encuentran las rocas metasedimentarias, intrusivas-metamórficas e intrusivas. Las rocas metasedimentarias Pre-batolíticas de acuerdo con sus características litológicas y estructurales, se les considera como basamento impermeable y en esta misma se agrupan rocas intrusivas metamórficas.

Considerando su origen y litología, así como su relación con las rocas intrusivas, su funcionamiento es de una roca impermeable, así mismo las rocas intrusivas con algunas alteraciones por meteorización y fracturamiento las cuales pueden almacenar pequeñas cantidades de agua.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El sistema anteriormente descrito en el apartado de geología estructural constituye las unidades geológicas impermeables de la cuenca, formadas por rocas graníticas y metamórficas.

El rejuvenecimiento del paisaje ocasionado por el levantamiento de la zona propició una etapa de erosión en las Sierras acarreando grandes volúmenes de sedimentos hacia la terraza marina recién emergida, rellenando las lagunas marginales de agua salada que quedaron atrapadas durante la emersión.

El análisis de lo anterior y de los reconocimientos de campo, se desprende que las mejores zonas de permeabilidad las construyen los cauces recientes de los arroyos de San Francisquito y Santa María, dada su granulometría y a que representan los colectores del escurrimiento superficial de la cuenca y de la recarga acuífera al valle.

La planicie aluvial no se considera favorable para la exploración de aguas subterráneas, ya que es probable que a profundidad se encuentre contaminada con sales originadas por la evaporación de antiguas lagunas marginales. De acuerdo a las características que presenta la zona se considera que el acuífero es **de tipo libre.**

5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo al recorrido de campo, al reconocimiento y a los datos obtenidos respecto los parámetros dentro del acuífero, nos permite definir las características hidráulicas del acuífero, las cuales señalan que se trata de un acuífero de tipo libre con valores variables, de acuerdo con la granulometría que se presenta en la zona de captación.

Debido a que en el acuífero no se han ejecutado trabajos para determinar sus propiedades hidráulicas, se considera que son similares al acuífero San Felipe, dentro del estado de Baja California ya que presentan características similares. Es importante considerar que en la parte de la costa del área de balance se hallan depósitos de tipo eólico los cuales por sus características físicas tienen una permeabilidad media.

Para obtener un dato más preciso en cuanto a esta componente se tomó en cuenta el estudio realizado en marzo de 1977, donde se llevó a cabo un registro de perforación, aforo y equipamiento de 2 pozos el BC-1711 y el BC-1712 ubicados en el rancho El Pozo. Donde se reportan y determinan los siguientes resultados:

Tabla 3. Parámetros Hidráulicos

BC-1712		
Nivel Estático (NE)	10.37	m
Nivel Dinámico (ND)	13.45	m
Gasto (Q)	2	lps
Abatimiento	0.308	m
Gasto Especifico (Qe)	6.49	lps/m
Transmisividad (T)	**6.49E-03**	m^2/s
Espesor (b)	155	m
Permeabilidad (k)	4.19E-05	m/s
(k)	**3.6**	m/día

5.3 Piezometría

No existe información piezométrica histórica. Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con información correspondiente a 2008 en 6 aprovechamientos sobre una franja paralela a la costa (5 son pozos y 1 noria).

Para las configuraciones del nivel estático se cuenta con poco apoyo piezométrico debido a que existen muy pocos aprovechamientos, algunos de los cuales no pudieron sondearse. A pesar de ello, con la información verbal de los propietarios y con criterio hidrogeológico, asumiendo que el acuífero se encuentra en condiciones iniciales y en condición de subexplotación, las configuraciones de profundidad y elevación del NE, son muy semejantes a la configuración topográfica del terreno.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Para 2008 se observa que la profundidad varía entre 50 y 5 m, localizándose las mayores profundidades en la porción sur-oeste del Valle de San Luís Gonzaga, observándose variación gradual del nivel piezométrico hacia la costa (figura 3).

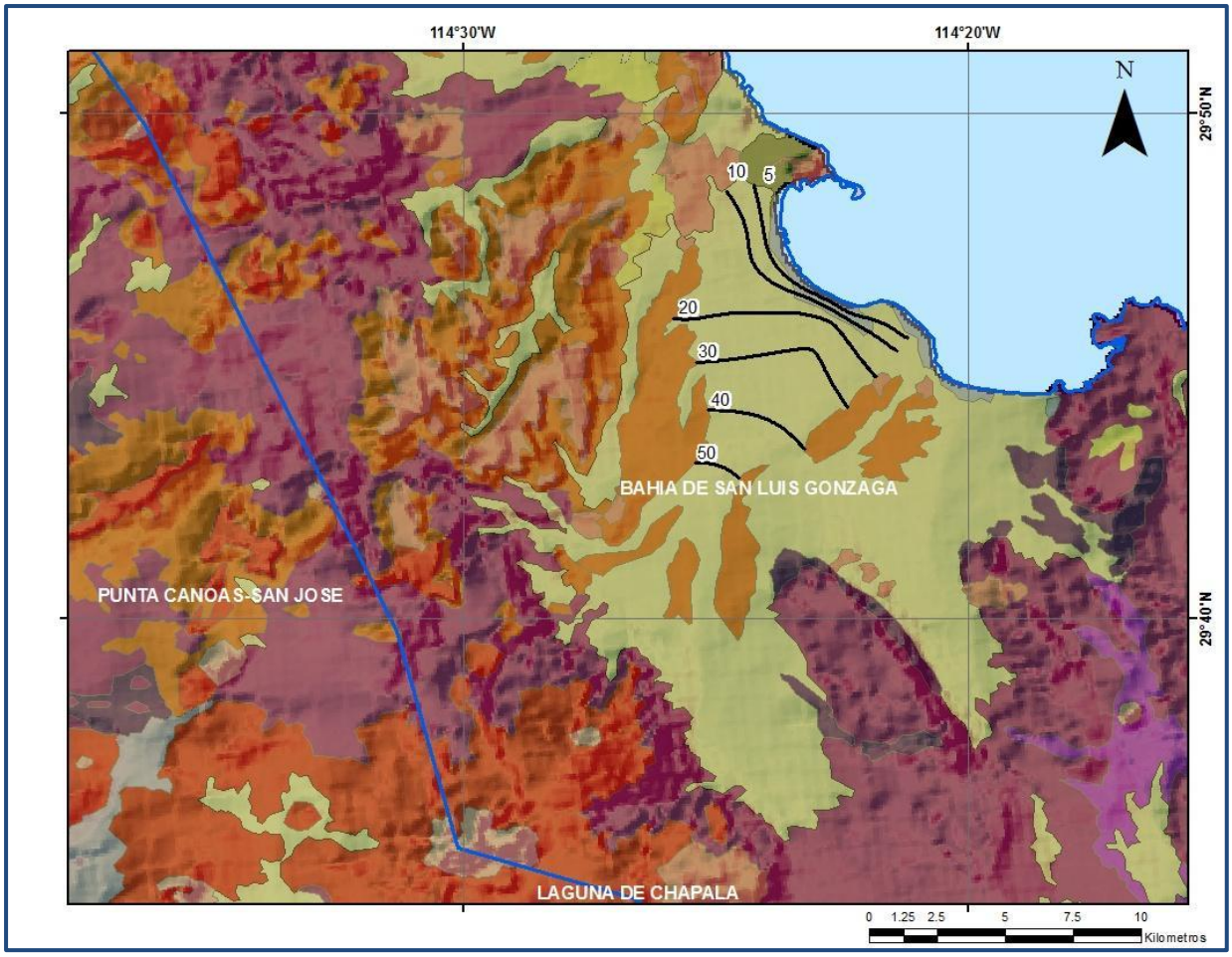

Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración para el análisis en cuanto a la elevación del nivel estático (figura 4), indica que hay una variación en el nivel del agua subterránea de 1.3 y 92 msnm, observándose en la parte suroeste las mayores elevaciones, y un descenso gradual hacia la costa con valores de 1.85 msnm al norte del área de balance y 1.55 msnm al sureste de la misma área. Considerando que el principal indicador del flujo subterráneo si las cargas están referidas a la elevación media del nivel del mar. De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación generan un movimiento en el agua subterránea con dirección hacia las zonas donde la elevación de los niveles de saturación son menores, siempre y cuando no existan fronteras que impidan el movimiento del flujo como es el caso del área acuífera de San Luís Gonzaga. Para el área de balance, las elevaciones reflejan que el flujo del agua en el subsuelo tiene semejanza con un hipotético flujo en condiciones naturales con dirección de Suroeste a Noreste, cuyo comportamiento es gradual hacia la costa.

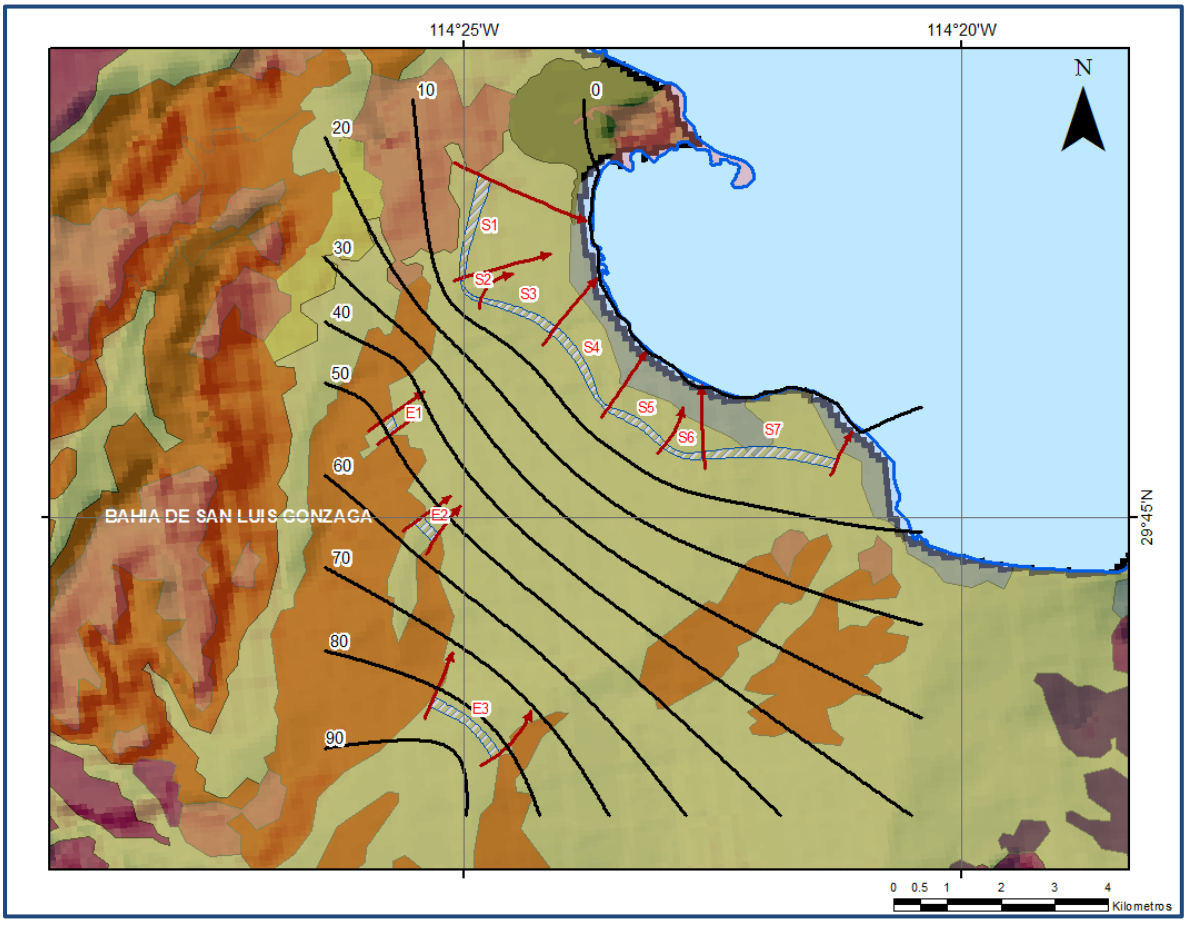

Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para este acuífero no se cuenta con información piezométrica histórica para poder realizar un análisis respecto a la evolución del nivel estático, así como tampoco existe un historial de extracciones (extracción actual no significativa). Por estas situaciones se considera que la evolución del nivel estático es nula y que el acuífero se encuentra en equilibrio hidrodinámico.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Dentro del área considerada como de explotación, se localizaron 6 aprovechamientos, de los cuales 5 son pozos y una noria, 5 se encuentran activos y uno inactivo. Se estimó que el volumen de extracción es de **0.5 hm³**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo únicamente para el año 2008, en una superficie de 45.73 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de almacenamiento

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en 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:

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

Donde:

Rv: Recarga Vertical
Eh: Entradas por flujo horizontal
B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo horizontal
ETR: Evapotranspiración real
ΔV(S): Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

En el acuífero la recarga por flujo horizontal de aguas subterráneas ocurre en la zona comprendida al occidente, en las fronteras laterales de la unidad sedimentaria, tal como se aprecia en la figura 6.

Con base en estas configuraciones se seleccionó un canal de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$\mathbf{Q = V \cdot A}$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:
K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.
i = Gradiente hidráulico (Δh / ΔL) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad T = K · a, la ecuación queda reducida a:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:
T = Transmisividad en m^2 /s.
B= Longitud de la celda en m.
i = Gradiente Hidráulico, en m.

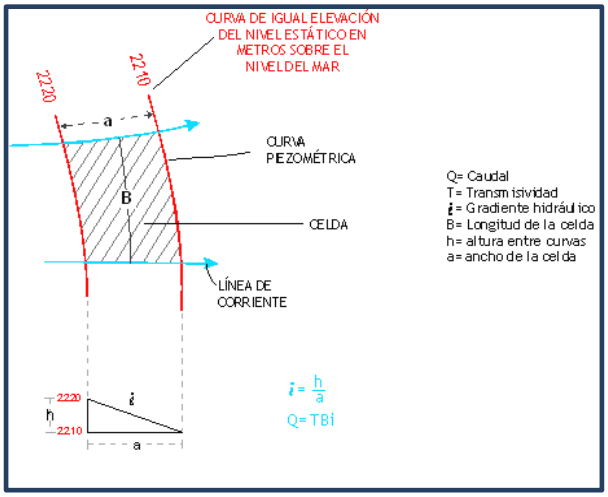

Tabla 4. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008

CANAL	LONGITUD B [m]	GRADIENTE (i)	T [m²/s]	CAUDAL (Q) [m³/s]	VOLUMEN [hm³/año]
E1	285	0.0095	0.0056	0.0152	0.478
E2	426	0.0114	0.0056	0.0272	0.858
E3	1475	0.0111	0.0072	0.1179	3.718
				TOTAL DE ENTRADAS	5.053

Se determinó que para el año de análisis, el volumen total de **Eh = 5.1 hm³.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y las salidas subterráneas hacia el mar (Sh). No existen manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo.

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

La Evapotranspiración se representa por la descarga de un acuífero 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 que existe.

Debido a la baja precipitación que se presenta en el área, se invalidaron los métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración (Turc y Smith), ya que éstos son aplicables en regiones con valores mayores a los 300 mm, considerando, además, que el área en la que se tienen niveles freáticos someros y donde se puede llevar a cabo este fenómeno es muy pequeña, aproximadamente 2.7 km². Por lo tanto el valor de evapotranspiración tiende a ser muy bajo o nulo. Por lo tanto para fines del balance de aguas subterráneas **ETR = 0**

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de 540,382 m³, con la finalidad de darle solución al balance se utiliza la cifra de **0.5 hm³.**

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (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; que se construyeron de la misma forma que para el cálculo de entradas.

Las salidas por flujo subterráneo (cuando existen), son hacia el mar. En este caso se determinaron 7 salidas a lo largo de la costa y se cuantificaron de acuerdo al procedimiento para el análisis de entradas, los valores se muestran en la tabla 5, figura 4.

Tabla 5. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008

CELDA	T [10^{-3} m^2/s]	LONGITUD B (m)	GRADIENTE (i)	CAUDAL Q [m^3 /s]	VOLUMEN ANUAL [hm^3]
S1	1.736	1935	0.0069	0.023	0.732
S2	1.736	517	0.0133	0.012	0.378
S3	1.736	1301	0.0083	0.019	0.593
S4	1.736	1727	0.0079	0.024	0.751
S5	1.736	1168	0.0099	0.020	0.634
S6	1.736	659	0.0082	0.009	0.296
S7	3.646	2221	0.0062	0.050	1.586
				TOTAL DE SALIDAS	4.970

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) para el año 2008, se considera es de **5.0 hm^3.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cambio de almacenamiento se estima a partir de las evoluciones de los niveles estáticos como un mínimo se deben considerar dos periodos en este caso debido a que se carece de información en cuanto a datos piezométricos se considera un valor de **cero** para este componente.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se evalúa la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, utilizando la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$Rv = 5.0 + 0.5 + 0.0 - 0.0 - 5.1$$

$$\mathbf{Rv = 0.4\ hm^3\ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, y las entradas horizontales subterráneas, como a continuación se muestra:

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$

$$R = 0.4 + 5.1 = 5.5$$

$$\mathbf{R = 5.5\ hm^3\ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, su valor es de **5.5 hm³/año**, todos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

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.

En este sentido la descarga natural comprometida, se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal, el cual se consideró en un 40% que corresponde a un volumen de **2.0 hm³ anuales**. El porcentaje se considera ya que el acuífero se considera está afectado naturalmente por agua salina, misma que impide la extracción y explotación dentro del acuífero. **DNC = 2.0 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 **95,985 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 de aguas Subterráneas (DAS)

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.

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$
$$\mathbf{DMA = 5.5 - 2.0 - 0.095985}$$
$$\mathbf{DMA = 3.404015\ hm^3/año.}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **3,404,015 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua (2005). Estudio para Actualizar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales Superficiales en las 85 (ochenta y cinco) Sub-regiones Hidrológicas de las 7 (siete) Regiones Hidrológicas de la Península de Baja California, Mediante la Aplicación de la NOM-011-CONAGUA-2000. Universidad Autónoma de Baja California.