



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA BOCANA-LLANOS DE SAN PEDRO
(0242), 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	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo.....	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Parámetros hidráulicos	12
5.3 Piezometría.....	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	15
7.1 Entradas.....	16
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	16
7.1.2 Recarga inducida (Ri).....	17
7.1.3 Entradas horizontales por flujo subterráneo (Eh)	17
7.2 Salidas	18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	18
7.2.2 Bombeo (B)	20
7.2.3 Salidas horizontales por flujo subterráneo (Sh)	20
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	20
8. DISPONIBILIDAD	21
8.1 Recarga total media anual (R).....	22
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	22
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	23
9. BIBLIOGRAFÍA	24

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero La Bocana- Llanos de San Pedro, definido con la clave por la Comisión Nacional del Agua, se encuentra ubicada en la porción sur-oriental del estado de Baja California, entre los paralelos 28° 24' y 28° 51' de latitud Norte y entre los meridianos 113° 10' y 113° 35' de longitud Oeste, tiene una superficie aproximada de 993 km². Figura 1.

Colinda al norte con el acuífero Bahía de los Ángeles, al Oeste con Nuevo Rosarito y Villa de Jesús María, al Sur con los acuíferos Llanos del Berrendo y San Rafael La Palma, todos ellos dentro del estado de Baja California, y al Este con el Golfo de California.

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 geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0242 LA BOCANA-LLANOS DE SAN PEDRO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	118	16	49.2	28	37	12.8	
2	118	18	13.9	28	33	28.2	
3	118	20	21.7	28	32	42.0	
4	118	20	30.9	28	28	44.3	
5	118	22	36.1	28	24	47.7	
6	118	25	3.6	28	26	13.4	
7	118	27	35.0	28	26	3.7	
8	118	30	47.1	28	26	55.0	
9	118	34	51.3	28	38	47.9	
10	118	30	29.3	28	40	57.3	
11	118	25	40.4	28	44	7.6	
12	118	21	0.2	28	48	13.5	DEL 12 AL 13 POR LA LINEA DE BAJAMARA A LO LARGO DE LA COSTA
13	118	9	50.0	28	40	31.8	
1	118	16	49.2	28	37	12.8	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto de veda tipo III *“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. De acuerdo con él, sólo se permiten 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 acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero se localiza dentro de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Valle de los Cirios”, con fecha de Decreto 2 de junio de 1980.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Existe información del acuífero, de finales de 1973, la entonces **SARH, a través de la Dirección de Obras de Riego para el Desarrollo Rural Noreste y Península de Baja**

California, realizó trabajos sobre PERFORACIÓN DE POZOS EN EL ACUÍFERO LA BOCANA.

En el pozo profundo, La Bocana 1, se determinaron algunos de los siguientes datos: profundidad de perforación de 12.13, diámetro de perforación de 17 ½”, diámetro de ademe de 10”, nivel estático de 5.94; así mismo el diámetro de la descarga es de 6” y de orificio de 6”, con gastos que oscilan entre 6.85 y 8.06 lps.

Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Península de Baja California (2008). ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 20 ACUÍFEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA.

El objetivo principal de este estudio fue plantear el balance preliminar de aguas subterráneas para determinar la disponibilidad, mediante la realización actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

Fisiográficamente, el acuífero se encuentra localizado dentro de la provincia Sierras de Baja California, Subprovincia Sierra Volcánica (Según Miguel Álvarez Jr.); localmente se caracteriza por exhibir un relieve abrupto conformado por sierras que se encuentran orientadas en sentido norte-sur y noroeste-sureste, con elevaciones que alcanzan los 1600 msnm y sobresalen hasta 1000 m con respecto a la elevación de los valles.

Las sierras dispuestas paralelamente a la costa del Golfo de California continúan hacia el mar sin formar ninguna llanura costera. Dentro de las principales elevaciones se encuentran las sierras Las Ánimas, Las Flores, La Libertad, Salorio, El Toro y Cinta de La Cantera. Las depresiones se encuentran ocupadas por los Valles Agua Amarga, Rinconada de Salorio y Las Flores.

En la porción oriental se localiza la sierra Las Ánimas, constituida por rocas basálticas muy fracturadas y falladas, coronadas por rocas post-batolíticas representadas tanto por tobas y brechas riolíticas como por rocas basálticas.

La sierra La Libertad cuenta con elevaciones prominentes, se ubica en la parte central del área y está constituida en su mayor parte por rocas ígneas intrusivas, principalmente granitos, granodioritas y tonalitas, así como la presencia de algunos afloramientos aislados de rocas volcánicas y sedimentarias en su margen occidental.

3.2 Clima

El área del acuífero presenta diversos tipos de climas muy secos, ya que el régimen de lluvias no está repartido equitativamente en tiempo y espacio, por lo que resultan pocas precipitaciones en verano y el resto del año, por el contrario los porcentajes de lluvia invernal son ligeramente mayores al 18% hasta un 36%. 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:

BWks: 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.

BWh(x’): Muy árido, semiárido, temperatura media anual entre 18 y 22° C, temperatura del mes más frío menor a 18° C, temperatura del mes más caliente mayor de 22° C; lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

BW(h’)(x’): Muy árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C; lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18 % del total anual. Por otro lado, el Valle de La Bocana-Llanos de San Pedro, de acuerdo con información histórica obtenida de la estación 002 Bahía de los Ángeles, presenta mucha variación, ya que para el periodo de observación de 1963-1968, se registró la mayor precipitación total anual la cual fue de 272 mm lo que conlleva a una precipitación extraordinaria o una avenida máxima, por lo que los efectos de dicha precipitación propiciaron una erosión de los materiales más jóvenes de la geología local, aunado con un intemperismo y meteorización producto de múltiples factores como el estado del tiempo extremoso, el viento, la radiación, etc. Para el año 1999, los datos registrados fueron de 0 mm. Así mismo, las precipitaciones medias mensuales históricas más altas se registraron en el mes de septiembre con 13.1 mm, por tanto el mes que registra la menor fue Junio con 0 mm.

La estación meteorológica en sus años de observación de los fenómenos meteorológicos, de 1953-2007, reporta una temperatura media anual de 22.6° C, se reporta también al mes de enero como el mes histórico más frío con 1° C en 2002, cabe mencionar que las heladas no son representativas ya que únicamente se tienen registro de 2 en los meses de diciembre y enero, por otro lado el mes más caluroso ocurrió en el mes de Julio de 1997 con 49.0° C.

Las lluvias son muy escasas en la mayor parte de la región, con una precipitación media anual de 76 mm, máxima extraordinaria de 235 mm, registrada en 1983, y mínima de 9 mm registrada en 1986; las precipitaciones se presentan principalmente de octubre a marzo.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 5 “Baja California Centro Este”, que se caracteriza por ser una larga faja de la vertiente del Golfo de California. El desarrollo del litoral que le corresponde es de 465 km, con un ancho máximo de 50 km.

El acuífero está integrado por las cuencas hidrográficas Bahía de los Ángeles y Agua Amarga. La red hidrográfica que recarga el acuífero es aportada por una serie de arroyos que tienen origen en el flanco Este de la Sierra La Libertad: La Terminal, San Juan, Cañada La Borreguera, Cañada El Tigre, Cañada La Víbora y El Pulpo; los primeros cuatro arroyos integran el Arroyo La Gobernadora, que escurre longitudinalmente en el flanco Este del valle.

En la porción Oeste de la Sierra La Libertad, escurre el arroyo El Cañoncito-Angostura, que drena la zona conocida como Rinconada Salorio e integra una cuenca con una superficie aproximada de 100 km², el cual finalmente descarga al Norte del Poblado Bahía de los Ángeles, en el Golfo de California. El funcionamiento de esta pequeña subcuenca es independiente, aún cuando corresponde a la cuenca Bahía de los Ángeles.

La porción sureste del valle se integra desde la Sierra Las Ánimas, el Arroyo La Tinaja y La Gobernadora. De la Sierra Las Flores escurren hacia el Oeste pequeños arroyos que se incorporan al Arroyo La Gobernadora.

3.4 Geomorfología

El acuífero se encuentra limitado al poniente por la Sierra La Libertad y al oriente por las sierras Las Ánimas y Las Flores, con un desarrollo desde la línea de costa hacia el sur de más de 26 km de longitud y 5 km de amplitud. La superficie está cubierta predominantemente por depósitos aluviales, eólicos, lacustres y fluviales.

4. GEOLOGÍA

Las unidades expuestas en el acuífero varían del Mesozoico Inferior al Reciente. La base de la secuencia mesozoica está representada por rocas metasedimentarias ortometamórficas e ígneas intrusivas batolíticas, cuya edad probable es el Triásico; en ella se encuentran paquetes interdigitados de esquistos, filitas, pizarras y gneises (Figura 2). Las rocas de edad Cretácica están representadas por rocas ígneas intrusivas, metamórficas con metamorfismo incipiente y zonas intrusivas con bandeamiento, localizado en los bordes de las masas intrusivas.

Dentro de las rocas intrusivas expuestas predominan las tonalitas y granodioritas, de color gris claro con tonos blanquecinos, que muestran textura holocristalina de grano grueso; los granitos presentan color gris claro con tonalidades rojizas y se encuentran muy fracturados.

Las rocas intrusivas básicas son las más antiguas dentro del acuífero, mientras que las de composición ácida corresponden a edades más recientes, las cuales se encuentran encajonadas en la unidad básica y subyacen a las diferentes unidades del Cenozoico, aflorando generalmente en franjas orientadas de noreste a sureste (figura 2).

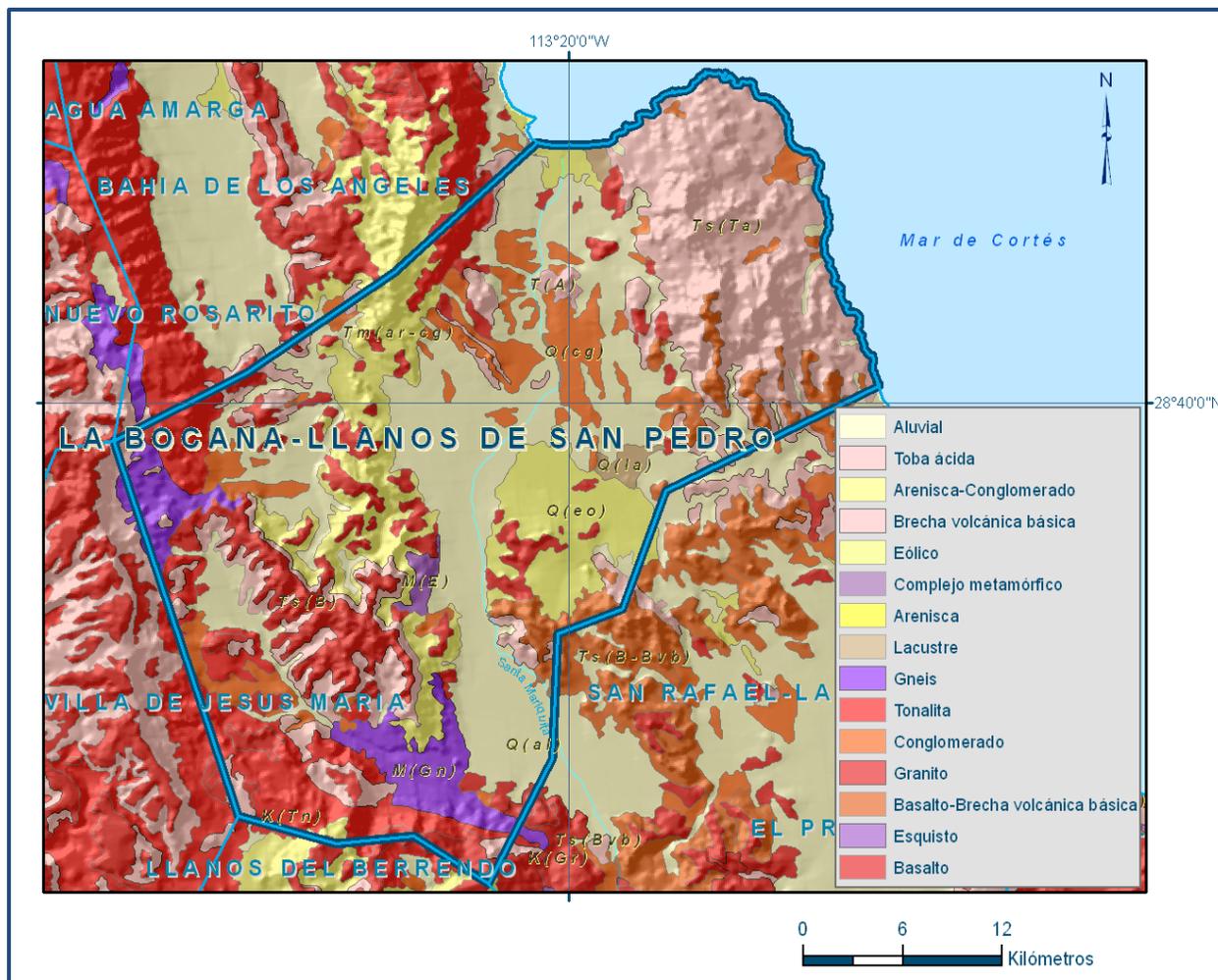


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Formación Tepetate (Tiar-Im): Litológicamente esta unidad marina consiste en una intercalación de areniscas amarillentas a café rojizas, con areniscas conglomeráticas, lodolitas y fangolitas con lentes concrecionales.

Las areniscas se presentan en estratos, por lo general delgados a medianos de no más de 40 cm de espesor, con una ligera inclinación hacia el mar, de grano fino y con buena clasificación; algunas capas tienen residuos de halita (NaCl).

Presenta un sistema de fracturas de espaciamiento moderado, con relleno de yeso, así como estratos muy fosilíferos con abundantes turrítelas y foraminíferos.

Formación Alisitos (Krm): constituida por una serie de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias; las primeras de composición andesítica, mientras que las rocas sedimentarias están constituidas por la denudación de las rocas volcánicas y vulcanoclásticas.

Están afectadas por un proceso de dinamometamorfismo el cual disminuye de oriente a poniente. Esta unidad se encuentra coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico en forma discordante.

Plioceno: representado por rocas de origen marino y continental, esta unidad está formada por areniscas de grano fino, aparentemente sin cementante arcilloso y conglomerados formados por fragmentos de rocas volcánicas e ígneas intrusivas embebidos en una matriz calcárea.

Dentro del área las rocas sedimentarias presentan una distribución restringida. Las unidades que cubren mayor área de exposición dentro del acuífero corresponden a los depósitos sedimentarios no consolidados del Cuaternario y Reciente, representados por material aluvial, piedemonte, fluvial, eólico, lacustre, arcillas y conglomerados.

A estas unidades se les encuentra formando planicies aluviales así como rellenos de los valles fluviales, su mayor espesor se encuentra dentro del Valle de Bahía de los Ángeles. A continuación se describen estas unidades.

Unidad Aluvial (Qal): constituida por arenas limpias de diferente granulometría, por gravas y gravillas bien graduadas derivadas de rocas ígneas intrusivas, metamórficas, volcánicas y sedimentarias preexistentes. Esta unidad presenta mayor importancia por su capacidad para almacenar agua.

Unidad Eólica (Qeo): Integrada por arenas de grano fino a medio, bien redondeadas y clasificadas, derivadas de rocas ígneas y metamórficas; que presentan fragmentos de moluscos. Esta unidad está expuesta en las zonas costeras donde forma dunas dispuestas de manera paralela a la línea de costa; en algunos valles se presenta con un espesor de unos cuantos metros.

Unidad Lacustre (Q1a): compuesta por estratos delgados y laminares de arenas finas intercaladas con horizontes de arcillas, esta unidad se localiza en la línea de costa del Valle Agua Amarga. Debido a su origen y constitución granulométrica, almacenan agua con altas concentraciones de sólidos totales disueltos.

4.2 Geología estructural

La zona del acuífero se caracteriza por una intensa actividad tectónica. En la zona se encuentran las siguientes fallas normales: Falla Ballenas, Falla Partida y Falla San Lorenzo (Escalona-Alcázar, 1999).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación de la geología del subsuelo y las características de las unidades litológicas que lo conforman, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, de tipo libre, conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente. Estas son las formaciones que se explotan actualmente.

El medio granular está constituido por materiales aluviales de granulometría variada que constituyen el relleno de los valles y el medio fracturado está conformado por la secuencia de areniscas y conglomerados, así como las rocas volcánicas (tobas y basaltos).

Existe interconexión hidráulica entre ambos medios, de tal manera que el espesor del acuífero puede alcanzar varias decenas de metros en el centro de los valles, dependiendo de la profundidad del fracturamiento, y disminuir gradualmente hacia los flancos de las sierras que los rodean.

Verticalmente la frontera superior es la posición del nivel freático y las fronteras inferiores y laterales están constituidas por las rocas que constituyen el medio fracturado, cuando su permeabilidad secundaria por fracturamiento desaparece, así como las rocas ígneas intrusivas y metamórficas que conforman las sierras que delimitan el acuífero.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de tipo libre, se compone principalmente de sedimentos no consolidados a lo largo del cauce de los arroyos y en la zona de la planicie costera; es de granulometría fina a gruesa, desde arcillas a arenas, así como depósitos eólicos. Aunque no se explota, debajo de estos depósitos se aloja un medio fracturado conformado por la secuencia de areniscas y conglomerados, así como tobas y basaltos.

El valle es de origen tectónico y se encuentra bordeado en su flanco occidental por rocas ígneas intrusivas, y metamórficas impermeables mientras que su flanco oriental está constituido por rocas extrusivas volcánicas, de baja permeabilidad, excepto cuando presentan fracturamiento.

Durante el Pleistoceno los movimientos epirogénicos que sufrió la Península de Baja California, ocasionaron en el área la invasión del mar sobre la entonces cuenca en formación, como consecuencia al retirarse el mar originó la formación de salinas, que posteriormente fueron rellenadas por depósitos aluviales.

Actualmente estos depósitos salinos se encuentran representados por terrazas topográficas con elevaciones de hasta 80 msnm. Debido a las condiciones de formación de la cuenca, los pozos y norias perforadas en el valle captan agua con alto contenido en sales, lo cual restringe su aprovechamiento.

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 San Simón, San Felipe, entre otros, dentro del estado de Baja California, ya que presentan características geológicas e hidrogeológicas similares. Por ello, los valores que se asocian a la transmisividad varían entre 1.5×10^{-2} y 1.1×10^{-4} m²/s, obtenidos mediante la interpretación de pruebas de bombeo. En ninguna de ellas se contó con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

En el área que cubre el acuífero no existe historial piezométrico. Sólo para el año 2008 se tiene el registro piezométrico en un solo aprovechamiento del cual se obtuvo el nivel estático. Así mismo se encuentra una zona de inundación ubicada al final del arroyo Los Paredones y San Pedro, a partir de la medición de nivel estático, se realizó una extrapolación apoyada con la línea de costa y la elevación topográfica del terreno. Por esta razón para obtener información confiable para la configuración de las líneas equipotenciales, se considera que la línea de costa en el área de explotación es la línea piezométrica que teóricamente es igual a 0 msnm.

Adicionalmente, se considera que el área de explotación se constituye de materiales con cierta homogeneidad y sus propiedades hidráulicas se consideran isotrópicas.

Con estas suposiciones se infiere que el gradiente hidráulico de la costa hacia niveles piezométricos superiores es uniforme generando una equipotenciales con tendencia paralela a la línea de costa. De esta información se desprende lo siguiente.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En el recorrido de campo efectuado en el mes de noviembre del año 2008, se midió la profundidad al nivel estático en los aprovechamientos establecidos en el acuífero.

La profundidad al nivel estático (noviembre del 2008) en el pozo es de 0.2 cm. El aprovechamiento es una noria que intercepta el flujo subálveo.

Los valores más someros se localizan hacia la zona que limita con la salida del flujo subterráneo que alimenta la laguna.

5.4.2 Elevación del nivel estático

Los niveles de brocal se tomaron a partir de las cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI. De esta forma se procedió a calcular la elevación del nivel estático en la zona comprendida entre los aprovechamientos ubicados en las rancherías y la zona donde de forma natural se descarga el agua subterránea.

La figura 3 muestra las cotas de elevación de las cargas hidráulicas así como las líneas de flujo que se conceptualizan para el acuífero.

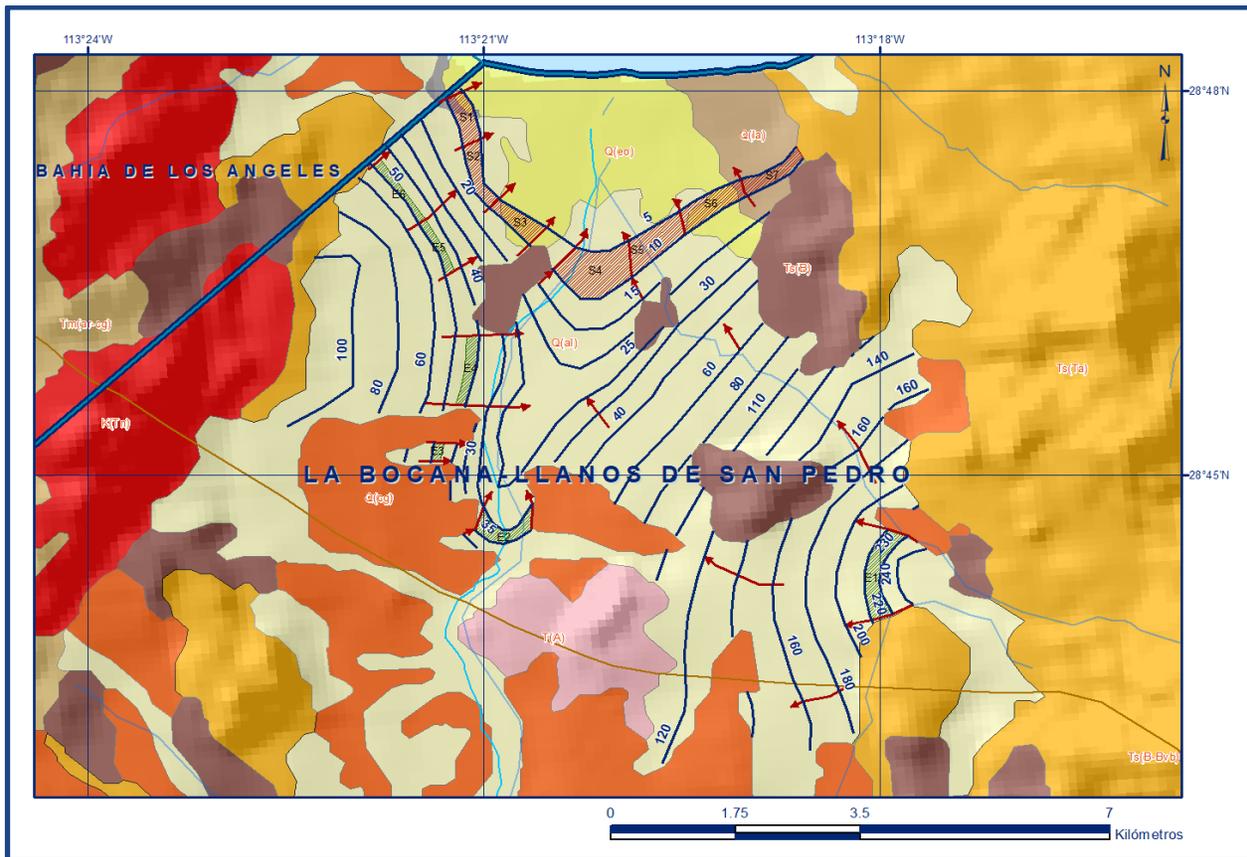


Figura 3. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

Tomando en cuenta este esquema se procedió a calcular los valores de entrada y salida subterránea del acuífero considerando que toda el agua subterránea que entra al acuífero se descarga manera natural por el acuífero debido a que el sistema se encuentra en una condición de equilibrio, donde no existe espacio para almacenar el agua subterránea.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita elaborar una configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Adicionalmente, aunque la configuración de la elevación del nivel estático está inferida, la incipiente extracción que se realiza no ha causado aún la alteración de las condiciones del estado inicial del régimen de flujo subterráneo.

El volumen de extracción es muy inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No se cuenta con información hidrogeoquímica reciente; ya que el acuífero no cuenta con ninguna obra donde se pueda realizar el muestreo físico químico, sin embargo, se considera desde el punto de vista geológico que el acuífero se encuentra salinizado lo cual se debe a los movimientos de transgresión y regresión que ocurrieron durante el periodo de formación de la cuenca, originando como consecuencia la formación de salinas, que posteriormente fueron cubiertas por depósitos sedimentarios.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el acuífero no se cuenta con un censo de aprovechamientos recientes, además de que las condiciones de mala calidad del agua subterránea restringen su explotación y limitan el desarrollo de los diferentes sectores usuarios.

De acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) en el acuífero no existen obras que permitan la extracción del agua subterránea considerando un valor de 0 en cuanto al volumen concesionado.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea involucra el registro de las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento, modificaciones que suceden en un volumen específico del acuífero en un determinado tiempo.

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

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

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

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

La ecuación de balance para el año 2008 en el Valle de La Bocana-Llanos de San Pedro, es la siguiente:

$$Eh + Rv + Ri - (B + Sh + ETR) = \Delta V(S)$$

Donde:

Eh = Entradas horizontales por flujo subterráneo

Rv = Recarga vertical

Ri = Recarga inducida

B = Bombeo

Sh = Salidas horizontales por flujo subterráneo

ETR = Evapotranspiración

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

Con base en la red de flujo inferida para el año 2008, y de acuerdo con la topografía y con el espesor de los depósitos aluviales que conforman el acuífero, se planteó el balance de aguas subterráneas en una superficie de 51.24 km².

Es importante señalar que los resultados del balance deben tomarse con mucha reserva debido a que ante la falta de información piezométrica es necesario hacer inferencias y estimaciones que permitan el cálculo de las componentes del balance. Conforme se genere mayor información hidrogeológica del acuífero, podrá replantearse el balance para calcular la recarga media anual y la disponibilidad.

7.1 Entradas

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Esta recarga está constituida por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle, y de las infiltraciones a lo largo del cauce.

Este componente se seleccionó como incógnita en la ecuación de balance de agua subterránea, debido a que no existe información referente a los valores de escurrimiento superficial. Por lo tanto su estimación se efectuó a partir de la ecuación de balance de la siguiente manera:

$$R_v = (\Delta V'S) + (B + Sh + ETR) - Eh$$

7.1.2 Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida se constituye principalmente por retorno de riego, infiltración de obras hidroagrícolas así como la infiltración de las redes de agua potable. En el área de balance, el volumen de agua subterránea explotado para uso agrícola no se encuentra presente. Por esta razón la recarga inducida al acuífero se considera despreciable. **Ri = 0.**

7.1.3 Entradas horizontales por flujo subterráneo (Eh)

La estimación de esta componente se realizó utilizando la configuración de la elevación del nivel estático del 2008, en la cual se definieron las direcciones y celdas de flujo que junto con la Transmisividad y gradiente hidráulico, definieron los caudales que circulan en el acuífero. Se presenta el cálculo de la componente de flujo subterráneo en la tabla 2.

Con base en la configuración se seleccionaron las celdas 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 una de las celdas establecidas.

$$Q = B * i * T$$

Donde:

B = Ancho (m) del canal de flujo

i = Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T = Transmisividad en el canal de flujo.

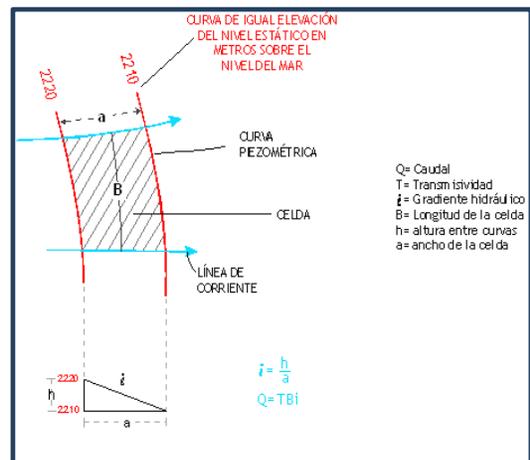


Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (10^{-3} m)	i	Q (m^3/s)	Vol. anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E ₁	0.694	1.290	0.04167	0.0373	1.177
E ₂	0.694	0.89	0.01818	0.0112	0.354
E ₃	0.694	0.29	0.03448	0.0069	0.219
E ₄	0.694	1.00	0.03579	0.0249	0.784
E ₅	0.694	0.85	0.04789	0.0283	0.892
E ₆	0.694	1.055	0.04353	0.0319	1.006

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 para el área de explotación es de **4.4 hm³**.

7.2 Salidas

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

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 observar el fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973) figura 4.

En la tabla 3 se muestran los porcentajes respecto al volumen evaporado para las profundidades de 100, 200 y 300 cm, para el año 2008.

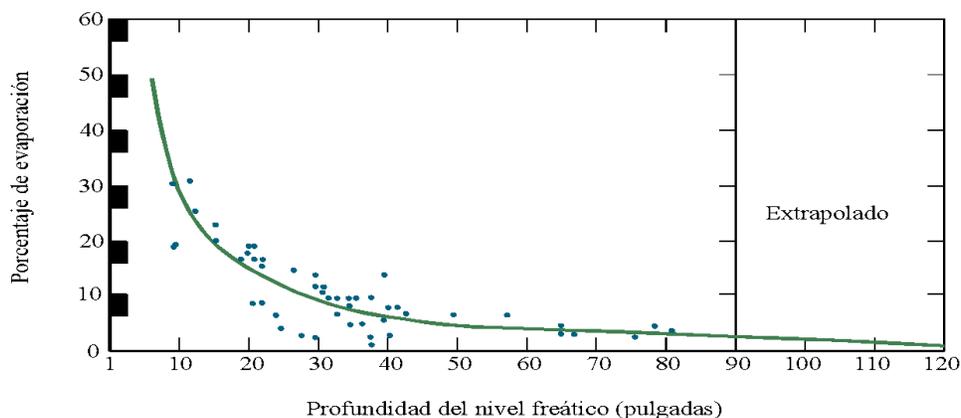


Figura 4. Evaporación del agua Subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático (según White).

El porcentaje evaporado se estimó de la representación gráfica realizada por White, respecto a la evaporación de los suelos que varían desde arcillas a limos.

Para obtener el volumen total de evapotranspiración, se multiplica el porcentaje estimado por la lámina evaporada en este caso es de 2,020 mm para 2008 este valor se tomó de un promedio estimado de acuerdo a los años en que existe información, (CONAGUA Gerencia Regional de Baja California), con estos valores se obtuvo una lámina evaporada para cada año de acuerdo a la profundidad media al nivel estático (100, 200 y 300 cm), multiplicando finalmente por el área susceptible a la evaporación respecto a cada año de análisis se obtuvo un volumen anual de evapotranspiración; para el año 1989 de 35.08 hm³ y para 2007 un volumen de 32.32 hm³.

Tabla 3. Volumen de evapotranspiración respecto al % estimado a la gráfica de White de acuerdo al área

Prof. media al nivel estatico (cm)	% de evaporación (estimado grafica de White)	Lámina evaporada (mm/año)	Lámina evaporada de acuerdo a la profundidad (mm/día)	Área (km ²)	Volumen evapotranspirado (hm ³ /año)	Total Volumen Evapotraspirado (hm ³ /año)
1989						
100	6.25	2,020	0.35	2.0	1.12	
200	3.75	2,020	0.21	0.0	0.0	
300	0.92	2,020	0.05	0.0	0.0	
						1.12

Finalmente, respecto al cálculo de volumen de evapotranspiración para el año de análisis, el cual dio como resultado un volumen por evapotranspiración (ETR) de **1.1 hm³/año**.

7.2.2 Bombeo (B)

De acuerdo con el Registro Público de derechos de Agua (REPDA), en el acuífero no existen obras por lo que no se tiene un volumen concesionado.

7.2.3 Salidas horizontales por flujo subterráneo (Sh)

Para calcular el volumen que se descarga naturalmente el acuífero, dentro del área de balance por flujo subterráneo, se consideraron los parámetros hidráulicos del mismo y las configuraciones; el acuífero La Bocana Llanos de San Pedro es un acuífero costero, por lo que existe una zona a partir de la cual, el espesor del acuífero va disminuyendo debido a la presencia de la zona de interfase agua marina-agua continental (tabla 4).

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

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (10 ³ m)	i	Q (m ³ /s)	Vol. anual (hm ³)
SALIDAS LATERALES					
S ₁	1.042	0.780	0.0223	0.0181	0.570
S ₂	1.215	0.935	0.02495	0.0283	0.894
S ₃	1.215	0.715	0.02121	0.0184	0.581
S ₄	1.563	0.920	0.01069	0.0154	0.485
S ₅	1.042	0.880	0.1128	0.0103	0.326
S ₆	0.810	0.910	0.01608	0.0119	0.374
S ₇	0.810	0.865	0.02193	0.0154	0.485

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) para el año 2008 para el área de explotación es de **3.7 hm³**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, es de esperar que no se registren alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento.

Bajo lo anterior, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto para fines del balance de aguas subterráneas, $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión:

$$R_v = (\Delta V'S) + (B + Sh + ETR) - E_h$$

$$R_v = 0.0 + (0.0 + 3.7 + 1.1) - 4.4$$

$$R_v = 0.4 \text{ hm}^3/\text{anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.40 + 4.4$$

$$R = 4.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **4.8 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.

En este sentido la descarga natural comprometida se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal el cual se estimó en un 20% con un volumen de **0.7 hm³/año**, el porcentaje se considera porque la zona no presenta un entorno ecológico el cual requiera de este recurso para sostenerse o bien mantenerse en equilibrio, además de que el acuífero se encuentra afectado naturalmente por intrusión marina, por lo que se propone controlar el bombeo dentro de la zona cercana a la costa manteniendo los niveles de agua dulce por arriba del nivel del mar, para de cierta forma no incrementar la entrada de agua de mar hacia el área de explotación.

DNC = 0.7 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 **8,760 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 4.8 - 0.7 - 0.008760 \\ \text{DMA} &= 4.091240 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,091,240 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Baja California, 2008. Estudio Técnico para determinar la Disponibilidad de las Aguas Subterráneas en 20 acuíferos del estado de Baja California.

INEGI. 1995. Estudio Hidrológico del Estado de Baja California. Gobierno del Estado de Baja California. Aguascalientes, Ags. México. 1^{er} impresión.