



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNA SALADA (0209), 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	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia Fisiográfica.....	6
3.2 Clima	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	12
4.2 Geología estructural.....	17
4.3 Geología del subsuelo.....	19
5. HIDROGEOLOGÍA.....	20
5.1 Tipo de acuífero.....	20
5.2 Parámetros hidráulicos	21
5.3 Piezometría.....	22
5.4 Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1 Profundidad al nivel estático	22
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3 Evolución del nivel estático	25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	25
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	26
7.1 Entradas.....	27
7.1.1 Recarga vertical (rv)	27
7.1.2 Recarga inducida por retornos de riego (rr).....	28
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (eh)	28
7.2 Salidas	30
7.2.1 Extracción por bombeo (b)	30
7.3 Cambio de almacenamiento (δv_s)	30
8. DISPONIBILIDAD	32
8.1 Recarga total media anual (R).....	32
8.2 Descarga natural comprometida (dnc).....	32
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (veas).....	32
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (dma).....	33
9. BIBLIOGRAFÍA	34

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 Laguna Salada definido con la clave 0209 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Baja California, entre los paralelos 31° 23' y 32°39' de latitud norte y los meridianos 115° 02' y 115° 59' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 5,689 km² (figura 1). Limita al norte con la frontera internacional con Estados Unidos, al oriente con el acuífero Valle de Mexicali, al sur con los acuíferos El Chinero, Valle Chico-San Pedro Mártir, La Trinidad, Jamaú, San Vicente y al poniente con los acuíferos Ojos Negros, Real del Castillo, Las Palmas y La Rumorosa-Tecate en el estado de Baja California. Geopolíticamente el territorio del acuífero se ubica principalmente dentro del municipio Mexicali y parcialmente en su porción occidental se ubica en los municipios Tecate y 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 0209 LAGUNA SALADA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	48	54.2	32	38	27.2	
2	115	46	39.3	32	36	22.7	
3	115	43	58.8	32	35	54.2	
4	115	40	5.6	32	33	58.0	
5	115	38	25.0	32	31	18.8	
6	115	27	22.2	32	22	41.7	
7	115	23	4.1	32	19	10.3	
8	115	25	36.4	32	13	23.8	
9	115	18	5.1	32	6	33.7	
10	115	17	34.4	32	1	26.6	
11	115	2	17.4	31	44	22.0	
12	115	6	32.6	31	39	52.3	
13	115	7	32.6	31	37	49.1	
14	115	7	10.2	31	36	27.7	
15	115	12	44.4	31	35	33.8	
16	115	16	19.3	31	30	36.2	
17	115	18	6.0	31	31	29.5	
18	115	19	50.9	31	28	53.9	
19	115	24	13.2	31	27	46.5	
20	115	26	9.5	31	25	23.7	
21	115	32	50.8	31	22	48.5	
22	115	34	4.9	31	23	55.7	
23	115	32	4.8	31	30	28.1	
24	115	32	35.4	31	33	50.6	
25	115	26	46.0	31	36	2.5	
26	115	26	53.4	31	45	7.8	
27	115	31	12.6	31	49	54.2	
28	115	40	7.3	31	50	42.8	
29	115	45	8.0	31	47	17.7	
30	115	54	25.7	31	51	0.8	
31	115	54	57.1	31	57	15.6	
32	115	53	9.1	32	9	19.4	
33	115	58	59.8	32	16	6.9	
34	115	56	59.5	32	17	43.7	
35	115	53	53.3	32	20	10.3	
36	115	55	21.7	32	21	18.6	
37	115	54	59.4	32	27	3.8	
38	115	55	57.8	32	29	28.8	
39	115	53	17.1	32	36	12.9	
40	115	53	12.6	32	38	7.3	DEL 40 AL 1 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
1	115	48	54.2	32	38	27.2	

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Laguna Salada pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California. El territorio del acuífero se encuentra completamente vedado y 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 (DOF) el 15 de mayo de 1965; esta veda se clasifica como tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El principal usuario es el agrícola. En el territorio del acuífero no se localiza ninguna unidad o Distrito de Riego. Actualmente no se ha instalado el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

Hacia el centro-oeste del acuífero se localiza una pequeña porción del Parque Nacional Constitución de 1857, con fecha de decreto del 27 de abril de 1962, y hacia el sureste se localiza una pequeña porción de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, con fecha de decreto del 10 de junio de 1993.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación, se mencionan los estudios más recientes e importantes:

RECONNAISSANCE GEOLOGY OF DE STATE OF BAJA CALIFORNIA, elaborado por Gordon Gastil, Richard P. Philips y Edwin C. Allison en 1975. Como resultado se obtuvo un plano geológico a escala 1:250,000, que divide la geología histórica en los siguientes eventos: prebatolítico; emplazamiento en rocas batolíticas, con sus cuatro zonas metamórficas. Estructuralmente clasifica a Baja California en península oriental y central estable; litoral continental inestable y depresión del Golfo.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LAS ZONAS DE LAGUNA SALADA Y SAN FELIPE, ESTADO DE B.C., elaborado por Alas S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1981, en este estudio se determinaron las condiciones geohidrológicas que existían en ese momento.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LAS ZONAS DE LAGUNA SALADA, VALLE CHICO Y SAN FELIPE, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. de C.V., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1982. Las actividades de campo contempladas por este estudio tuvieron como objetivo determinar la condición geohidrológica de los acuíferos y evaluar su potencial hidráulico. Concluye que el acuífero recibe una recarga media anual de 12.84 hm³.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS PARA ACTUALIZAR LA

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA DE 10 ACUÍFEROS, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por Moro Ingeniería, S.C. para la Comisión Nacional del Agua en 2013. Los acuíferos estudiados fueron Tijuana, Tecate, Las Palmas, Ojos Negros, Laguna Salada, Maneadero, La Trinidad, Camalú, San Quintín y San Simón.

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

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

De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada por INEGI (1997), la superficie del acuífero se ubica dentro de dos provincias fisiográficas, la provincia Península de Baja California y la provincia Llanura Sonorense. La primera de ellas cubre totalmente la superficie de la península de Baja California, mientras que la provincia Llanura Sonorense se localiza en la porción nororiente del estado de Baja California.

La porción occidental del acuífero se le localiza en la subprovincia Sierras de Baja California Norte, la cual está representada en todo su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega et al., 1992).

La mejor exposición de esta subprovincia está representada por las sierras Juárez, San Felipe y San Pedro Mártir. Esta última, con una elevación máxima de 3,078 msnm en el cerro Pico del Diablo.

Se reconoce una gran variedad de tipos litológicos, estructuras y geofomas del relieve. Esta provincia está caracterizada por la presencia de tres cinturones pre-terciarios que corren a lo largo de la península.

La porción oriental del acuífero se localiza dentro de la subprovincia Desierto del Altar en la provincia Llanura Sonorense.

3.2 Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García, se determina que en la superficie que cubre el acuífero predominan los climas muy áridos o secos BW (con lluvias en verano, invierno y escasas todo el año); se presentan tres tipos: muy seco-semicálido (BW_{hw}(x')) y muy seco-templado (BW_{ks}(x')) y muy seco cálido (BW(h')_{hw}(x')). El clima muy seco semicálido se presenta en la porción sur del acuífero, el clima seco templado se registra en los extremos oriental y occidental, en las zonas topográficamente más altas; y el tipo muy seco semicálido en la porción central de la zona del acuífero.

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información de 2 estaciones: Col. Valle de la Trinidad (055) y Laguna Salada (088), con registro que comprende el periodo 1957-1997 y 1974-1990, respectivamente. Con base en esta información y utilizando el método de los polígonos de Thiessen se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son **19.1°C** y **165.0 mm**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de **125 mm**.

El régimen de lluvias se registra principalmente de diciembre a marzo; el máximo valor se presenta en febrero y junio es el mes más seco. Las temperaturas mínimas se registran entre los meses de diciembre a febrero.

La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de lluvias torrenciales. Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de lluvias extraordinarias, tienen un efecto en el ciclo hidrológico.

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

3.3 Hidrografía

El territorio del acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 4, Baja California noroeste (Laguna Salada), en la Cuenca Lago salado- Arroyo del Diablo, en la subcuenca Laguna Salada y forma parte de la vertiente del Océano Pacífico.

La zona está representada por una llanura aluvial cuyos límites son; al norte una serie de lomeríos, al sur las sierras Las Pintas y Las Tinajas, al este la sierra de los Cucapás y al oeste la sierra de Juárez. La Laguna Salada está alojada en una depresión que antiguamente recibía agua del Río Colorado, cuando en la subcuenca alta no existían obras hidráulicas para el control de sus avenidas.

3.4 Geomorfología

Las condiciones climáticas del área, la escasez de lluvia, el incipiente y poco desarrollo del drenaje, han contribuido a que el área se encuentre en una etapa de juventud tardía del ciclo geomorfológico. La región se encuentra conformada por una llanura aluvial con inundación rodeada de mesetas y sierras altas hacia el este y oeste. En la superficie del acuífero se identifican tres geoformas.

Valle o Llanura. Cubre aproximadamente el 50 % de la superficie total del acuífero, es un valle homogéneo de forma alargada con orientación NW-SE inclinado hacia el SW. Está constituido por depósitos aluviales, lacustres y eólicos.

Lomeríos y Mesetas. Se presentan en una franja orientada al NW, de manera paralela a la zona de sierras. Están constituidas por un conglomerado heterogéneo, formado por fragmentos de granitos, basaltos y calizas metamorfizadas, cuyo espesor supera los 50 m.

Su elevación varía entre 100 y 200 msnm y en general definen un sistema de drenaje de tipo paralelo, debido a que las mesetas se encuentran disectadas por cañones y cañadas. Las unidades que las conforman tienen permeabilidad media a baja debido a que su composición litológica incluye arenas arcillosas, así como depósitos de talud y abanicos aluviales, localizados al pie de las montañas.

Sierras y Cerros. Se ubican en la porción oriental y occidental del acuífero, cubriendo aproximadamente el 50 % de su superficie, con una orientación hacia el NW.

Están conformadas por rocas ígneas intrusivas como dioritas, tonalitas y granodioritas, así como metamórficas, en las que el patrón de fallas y fracturas permite la infiltración de las lluvias. El drenaje que predomina es de tipo subparalelo y en menor proporción dendrítico.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la región se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, et. al. 1992), de edad Mesozoica, de origen plutónico y de un ambiente de raíz de arco. Este intrusivo, conformado por tonalitas y granodioritas, se desarrolló del Cretácico al Cenozoico tardío y tiene una extensión de más de 400 km². La intrusión causó metamorfismo a las rocas prebatolíticas, transformándolas a gneis y esquisto. El fallamiento fuertemente escalonado que presenta la península de Baja California está relacionado con el desarrollo de los sistemas transformantes que dominan la tectónica regional.

La geología regional es el reflejo de una zonificación litológica-estructural que se manifiesta a lo largo de toda la península de Baja California. En el territorio del Estado de Baja California se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica cuyo rango geocronológico varía desde el Paleozoico hasta el Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológicas se puede definir según tres cinturones pre-terciarios que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Terciario y Cuaternario; su distribución de oeste a este es la siguiente:

El primer cinturón, ubicado en el extremo occidental de la península, está representado por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico Superior, poco consolidados y sin fuertes deformaciones tectónicas. Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados que contienen fósiles tanto de fauna marina como huesos de saurios.

El siguiente cinturón está conformado por secuencias de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias cuya edad asignada corresponde al Cretácico Inferior.

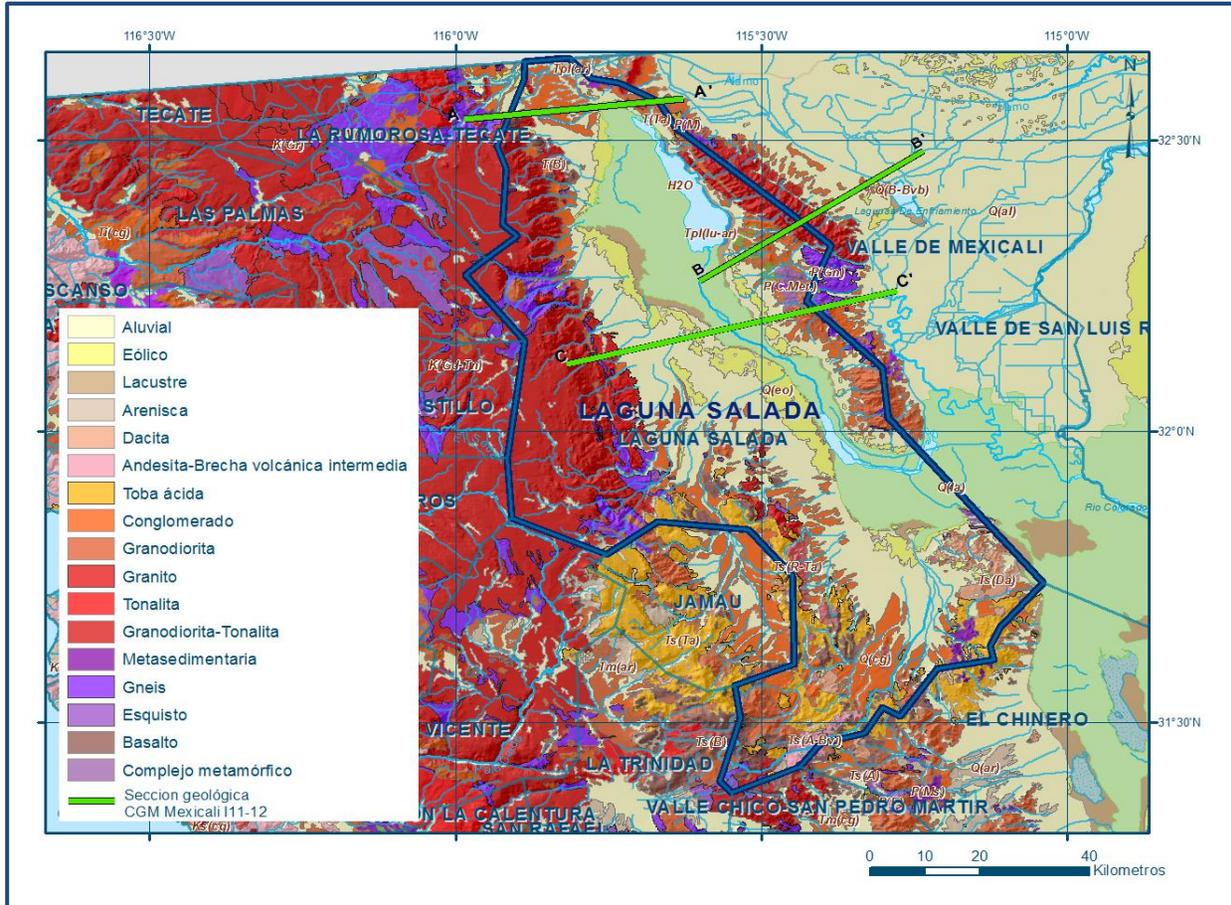


Figura 2. Geología general del acuífero

La secuencia superior y de mayor distribución fue definida originalmente por Santillán y Barrera (1930), in INEGI (1984), como Formación Alisitos, que está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfizada y afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península.

El tercer cinturón, ubicado en el borde oriental de la porción norte de la península, está constituido por rocas intrusivas y metamórficas producto del metamorfismo regional de rocas sedimentarias. A esta franja pertenecen los batolitos mesozoicos (tonalitas-granodioritas y granitos) y rocas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos, cuya edad no ha sido aún bien definida.

Las secuencias metamórficas prebatolíticas asociadas a este cinturón presentan diferentes facies metamórficas y su edad es motivo de discusión. Predominan los esquistos, gneises, cuarcitas y pizarras. La historia cenozoica está caracterizada por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales que afloran en diversas localidades, por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo en el borde occidental de la península, y por una importante actividad volcánica que cubre parcialmente los cinturones mesozoicos descritos.

Durante el Plioceno y Pleistoceno se acumularon depósitos marinos en una serie de terrazas que alcanzan una altura de hasta 500 m, asociadas a cambios glaciales del nivel del mar (Gastil et al., op. cit.), que se desarrollaron en el marco de una serie de levantamientos y basculamientos de las zonas costeras durante el Plioceno-Cuaternario (Ortlieb, 1978). Tierra adentro se presentan depósitos aluviales, eólicos y lacustres, cuya acumulación ocurre en la actualidad.

Regionalmente la zona está representada por un marco geológico que ha sido definido por la sucesión de eventos tectónicos relacionados con la evolución del borde occidental de Norteamérica, así como con los fenómenos que contribuyeron a la separación de la Península de Baja California.

El panorama morfoestructural que presenta hoy la región ha sido establecido por eventos geológicos que datan desde la Era Paleozoica y culminan con la apertura del Golfo de California, dominado por un ambiente de "Rifting", con fallamiento transforme. Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos tectonoestratigráficos: El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos.

El primero se distribuye en la porción oriental y el segundo en la región occidental. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas.

4.1 Estratigrafía

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Paleozoico al Reciente (figura 2). La zona del acuífero se encuentra sobre dos terrenos estratigráficos, el terreno Cortés y el terreno Alisitos.

Las rocas más antiguas del terreno Cortés, de Edad Paleozoica, se encuentran en el sureste del área y al sur de la Laguna Salada. Forman secuencias de rocas metamórficas, esquistos, cuarcitas, gneises, filitas y mármoles. En el sureste, las rocas Paleozoicas cubren una reducida extensión pues están cubiertas por rocas volcánicas del Cenozoico, de época Mioceno, constituidas por tobas riolíticas-tobas andesíticas, basaltos, tobas riolíticas, dacitas y andesitas. En el noreste de este terreno están expuestas en una franja alargada de la Sierra Pescadores, rocas intrusivas.

En la porción occidental, el terreno Alisitos está constituido en su totalidad por rocas batolíticas de la vertiente oriental de la sierra de Juárez donde predominan granodiorita y tonalita. El Cuaternario está expuesto ampliamente cubriendo toda la parte plana. La mayor extensión de estos sedimentos no consolidados son los clásticos lacustres; le siguen en extensión los aluviales, los semiconsolidados, los eólicos, y los palustres.

Paleozoico

Formaciones Zamora y El Volcán

Constituyen el basamento de la región y forman parte del Terreno Cortés. Están constituidas por rocas metasedimentarias conformadas por esquistos, gneises, pizarras, filitas, mármol, cuarcitas, calizas 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 son correlacionables con la secuencia paleozoica que aflora en la Sierra Las Pintas, asignada al Carbonífero por la presencia de crinoides, corales, bivalvos y braquiópodos.

Cretácico

Formación Alisitos (Cretácico Inferior)

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), al referirse a “una secuencia de 200 m de lutitas y areniscas metamorfoseadas del Cretácico Inferior que aflora en el Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomás, en el Estado de Baja California.

Esta unidad se extiende en una franja orientada NW-SE por espacio de 500 km de largo y 50 km de ancho (Almazán, 1988), a lo largo de la cual, debido a su naturaleza, presenta frecuentes variaciones horizontales”.

Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980).

Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. De acuerdo con Rangin (1978) in: INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental.

Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste. Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada en facies de esquistos verdes, afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Formación Rosario (Cretácico Superior)

Su nombre fue designado formalmente por Beal en 1948 (en López, R., 1985), para referirse a un afloramiento de areniscas de color café y arcillas de color oscuro, con lentes de conglomerado, asignándole una edad Campaniano-Maestrichtiano.

Su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Rosario, ubicado al noreste del poblado del mismo nombre. Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino; se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos pre-terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea "Santillán-Barrera" que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar. Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior, (b) miembro lodolítico medio y (c) miembro conglomerático-arenoso superior. Los tres presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico).

La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar. En términos geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerdan con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío. Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas la ubican estratigráficamente en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Su espesor máximo es de 750 m. Los afloramientos de esta unidad en la región se distribuyen a lo largo de la vertiente occidental de la Sierra San Miguel, configurando una serie de mesas de escasa elevación que se encuentran coronadas por los sedimentos marinos terciarios, sus exposiciones son muy angostas e irregulares y presentan una orientación NW-SE.

Terciario (Neógeno)

Rocas ígneas Intrusivas

Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro.

Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos. Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico.

Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques.

Neógeno Marino (Plioceno)

Se adoptó este nombre para designar a los depósitos de sedimentos que se distribuyen a lo largo de la margen occidental de la Sierra San Miguel que conforman las mesetas. Está constituido por areniscas y conglomerados, cuyos fragmentos fueron derivados de rocas ígneas y sedimentarias más antiguas que conforman los terrenos ubicados inmediatamente al este de la zona costera; presentan estructura masiva, con un grado bajo de fracturamiento.

Su espesor estimado difícilmente supera los 50 m. Según Gastil (1975) estos materiales se depositaron en la delgada franja costera que se extiende desde la Ciudad de Los Ángeles hasta los 28° de latitud norte, quedando incluidos en esta franja los sedimentos existentes en la zona de Camalú B.C.

Los depósitos marinos dieron origen a la formación de terrazas que actualmente pueden estar aflorando algunos kilómetros tierra adentro de la península y corresponde con lo que Heim (1922, en Gastil op.cit.) denominó Formación Salada.

Neógeno Continental (Plioceno)

Con este nombre se agruparon los depósitos de talud que se distribuyen sobre las unidades preterciarias que conforman las zonas de topografía elevada. Son materiales granulares producto de la denudación de rocas preexistentes que se encuentran consolidados, formando lomeríos sobre los flancos y base de las sierras.

Están conformados por conglomerados de rocas ígneas, cuyos fragmentos se encuentran soportados por una matriz areno-arcillosa, presentan estructura masiva y al intemperizarse tienden a formar bloques, su fracturamiento es escaso y presentan buena compactación.

La edad de estos depósitos fue determinada por Gastil (op. cit.) con base en su relación estratigráfica con los depósitos del Plioceno marino, por lo que les asignó esta misma edad. En el área de estudio se presentan sobreyaciendo discordantemente a los estratos de la Formación Alisitos y a las rocas intrusivas graníticas que conforman la Sierra de San Miguel.

Cuaternario marino (Pleistoceno)

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California. La Unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, op. cit.), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas.

Al sur de Rosarito los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada. En la planicie costera está cubierto por los materiales aluviales recientes o conformando pequeñas mesetas. Depósitos recientes. Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas; están representados por aluviones, depósitos de origen eólico, sedimentos lagunares, depósitos de dunas, depósitos de talud (bajo las mesetas) así como los depósitos fluviales sobre el cauce de los arroyos. Conforman el acuífero aluvial que actualmente se encuentra en explotación.

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte y en los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones abanicos aluviales. Están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación. Se encuentran distribuidos por toda el área cubriendo a las rocas más antiguas por medio de discordancias angulares y litológicas.

De acuerdo con los cortes litológicos de pozos, su espesor varía de 20 a 80 m. Los depósitos eólicos conforman dunas en la zona costera o en zonas topográficamente más bajas, hacia las bahías Camalú y San Ramón. Están constituidos por granos de arena cuarzo-feldespática, de granos bien clasificados, subredondeados y de tamaño medio a grueso, frecuentemente con estratificación cruzada, no consolidados, de espesor menor a 20 m.

Los depósitos lacustres se localizan en depresiones lagunares ubicadas en la zona cercana a la costa. Están conformados por arenas, limos y arcillas que frecuentemente contienen restos de ostrácodos; se presentan en el extremo occidental del área definiendo una franja irregular, interrumpida por afloramientos del cuaternario marino.

4.2 Geología Estructural

La característica estructural más importante son las grandes fallas regionales de rumbo NW-SE, truncadas por fallas NE-SW. Esta orientación es típica en la región y es atribuida a un régimen distensivo.

Los principales eventos tectónicos que han afectado a la región iniciaron en el Paleozoico, cuando la margen del cratón de Norteamérica se situaba en la actual Península de Baja California, época durante la cual se desarrolló una tectónica pasiva que originó una sedimentación estable.

La zona del acuífero se localiza en el Terreno Cortés, aquí el basamento del Paleozoico, se conforma por esquistos, calizas recristalizadas, gneises, cuarcitas y horizontes anfíbolíticos, con metamorfismo de facies esquistos verdes y anfíbolitas, afloran ampliamente en la parte norte de las sierras El Mayor y Cuapá. También se observan en el flanco este y oeste de la sierra de Juárez, por correlación se consideran similares a las que afloran en la sierra Las Pintas de edad Devónico-Carbonífero.

En el batolito de la sierra Juárez afloran dioritas con deformación dinámica localizada; granodiorita-tonalita y algunas monzonitas con emplazamiento de sub a interdiapírico, que constituye el bloque principal de la sierra de Juárez, bloque sur de la sierra El Mayor, cerro Colorado y cerro El Centinela. Dataciones isotópicas y trazas de fisión la ubican en el Cretácico superior.

En la sierra Cucapá y en el extremo oeste en el cerro Pinto, afloran tonalitas y granodioritas que intrusionan en la unidad anterior. Estas dos últimas unidades son platonos diferenciados y se considera el último evento de emplazamiento del Batolito Peninsular.

Cubriendo discordantemente en el extremo suroeste de la sierra Cucapá, se observa una unidad conocida como Conglomerado Cañón Rojo que conforma abanicos aluviales de arenisca conglomerática y conglomerado polimíctico de edad Plioceno-Pleistoceno.

Cubriendo discordantemente a las unidades del Plioceno se observa una unidad de conglomerado polimíctico con niveles de arenisca conocida como formación Canabrake similar en edad a la que aflora al este de Mexicali y en San Luis Río Colorado.

En los amplios valles existen cuatro tipos de depósitos semiconsolidados del Pleistoceno-Holoceno: lacustre que aflora en la Laguna Salada, depósitos limo-aluviales que afloran en los valles de Mexicali y San Luis Río Colorado; conglomerado que se observa al oeste de la Sierra El Mayor y noroeste de la sierra Cucapá y en el flanco este de la sierra Juárez; y arena que se localiza al sur de las sierras Tinajas Altas y El Rosario. Estos tipos de depósitos se presentan digitados entre sí.

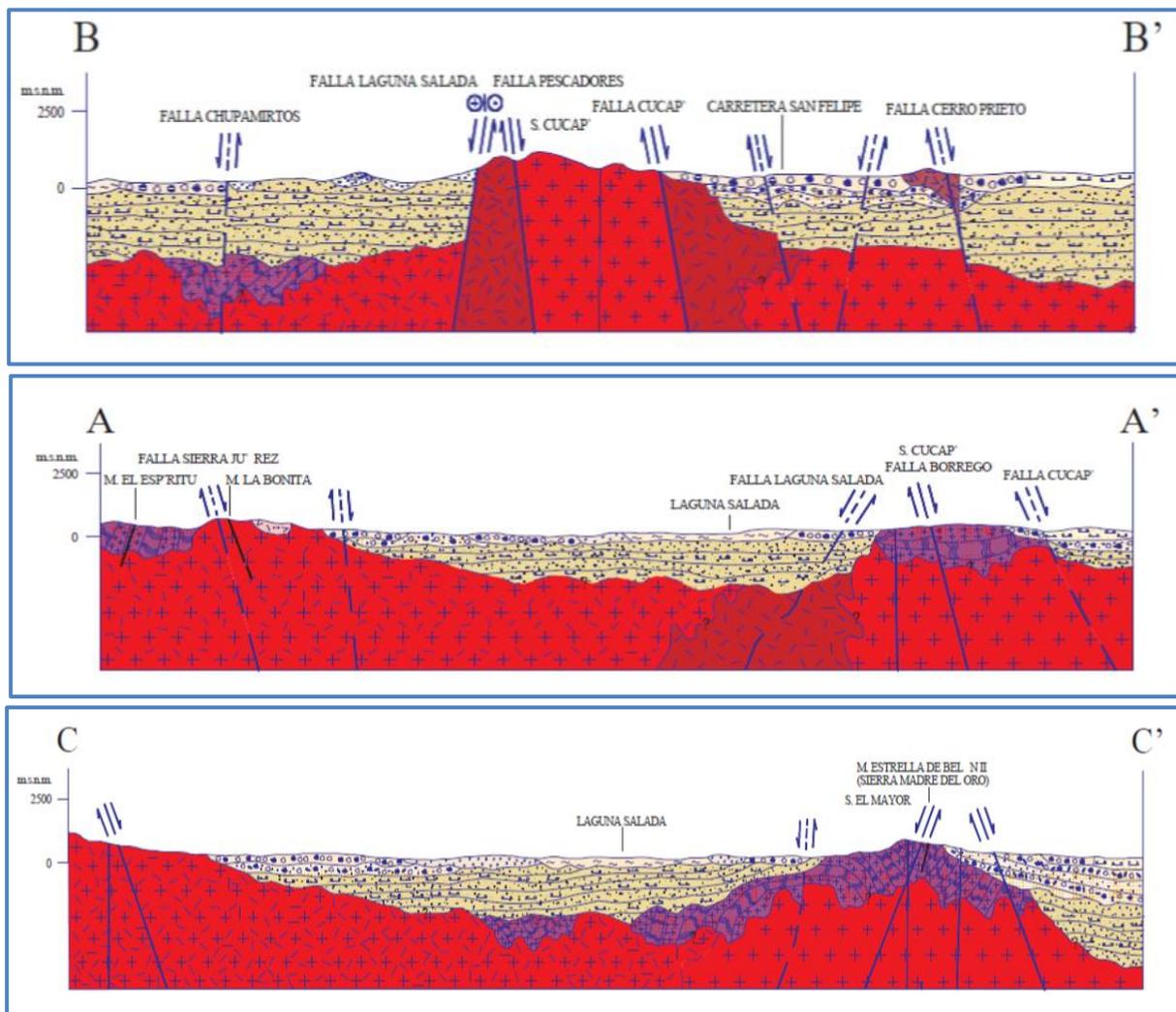
De esta misma edad se encuentra un aparato volcánico con coladas basálticas y andesitas basálticas conocido como Cerro Prieto. Los derrames se encuentran también digitados con los depósitos limo aluviales y conglomeráticos. Además existen depósitos sin consolidar de tipo palustre, eólico y aluvial.

Los rasgos morfoestructurales más importantes son las cuencas con orientación NNW-SSE que conforman el valle de Mexicali y laguna Salada y los altos de la sierra El Mayor-sierra Cucapá y la sierra Juárez, y las sierras El Rosario y Tinajas Altas.

Estos rasgos se encuentran delimitados por fallas y/o fracturas. En la sierra Cucapá se observa con mayor claridad un sistema de fracturamiento compensatorio muy importante con rumbo ENE-WSW conjugado con desplazamientos alternativos de ambos (Carta Geológico-Minera, Mexicali I11-12. Escala: 1:250 000).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial, fluvial y eólicos de granulometría variada y conglomerados, depositados en los cauces de los arroyos y en las partes topográficamente más bajas; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera, Mexicali I11-12. Escala: 1:250 000

Figura 3. Sección geológica

Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos) cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias. El espesor de los depósitos clásticos es de 20 a 80 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de tipo libre, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos.

Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, conglomerados y depósitos eólicos; en su porción inferior por rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

De acuerdo con su permeabilidad, es posible agrupar las distintas litologías en las unidades hidrogeológicas que a continuación se describen, las cuales conforman el medio poroso o granular y el medio fracturado por el que se desplaza el agua subterránea:

I) Depósitos granulares no consolidados de permeabilidad media a alta. Están constituidos por depósitos clásticos no consolidados del Terciario y Cuaternario, que rellenan la porción superior del valle y están compuestos por una gran diversidad de material granular, aluvial, fluvial y eólico; así como las areniscas y conglomerados de la Formación Rosario.

II) Derrames volcánicos, rocas sedimentarias y depósitos vulcanosedimentarios de permeabilidad media a baja. Dentro de esta unidad se considera la secuencia volcánica y vulcanosedimentaria del Cretácico Inferior y los derrames de basaltos cuaternarios. Su interés hidrogeológico se restringe a las zonas en las que sus afloramientos presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. En general funcionan como barreras al flujo subterráneo y basamento hidrogeológico.

III) Rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Esta unidad está integrada por los cuerpos intrusivos que afloran en la porción nororiental del acuífero, así como las secuencias metasedimentarias constituidas por filitas, esquistos, pizarras y gneises. Son materiales muy compactos, de baja conductividad hidráulica, que funcionan como basamento regional del acuífero y fronteras al flujo del agua subterránea; sin embargo, localmente el fracturamiento puede incrementar su permeabilidad.

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

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2013, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de corta duración (2 a 8 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, en el estudio llevado a cabo en 1982, se realizaron 7 pruebas de bombeo de corta duración también en etapas de abatimiento y recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que los valores de transmisividad varían de **2.3×10^{-5} a 24.9×10^{-3}** , predominando valores entre 0.5 y 2.0×10^{-3} m²/s. Los valores de conductividad hidráulica varían de **5.8×10^{-7} a 2.5×10^{-4} m/s (0.05 a 22.0 m/d)**. Los valores más altos se presentan en los depósitos granulares del cauce de los arroyos y los menores están asociados a depósitos de granulometría fina.

De la interpretación de las pruebas de bombeo por el método de Rathod and Rushton, se obtuvieron coeficientes de almacenamiento que varían de 0.005 a 0.01 y el almacenamiento específico entre 0.001 y 0.25. De manera general, los valores más altos de transmisividad se presentan en el centro del valle, asociados a los cauces de los arroyos.

La presencia de arcillas reduce la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Generalmente los caudales de extracción de los pozos son menores a 20 lps.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea y con fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2007-2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 varía de 5 a 70 m. La zona norte del valle es donde se registran los valores de mayor profundidad que van de 15 a 70 m cerca de los poblados Ejido Laguna Salada y Rancho Los Laureles del Desierto (figura 4). Los valores más someros se presentan en la porción sur del valle (figura 5). La profundidad en esta zona varía de 5 a 15 m, cerca del poblado Ejido José Saldaña No. 2.

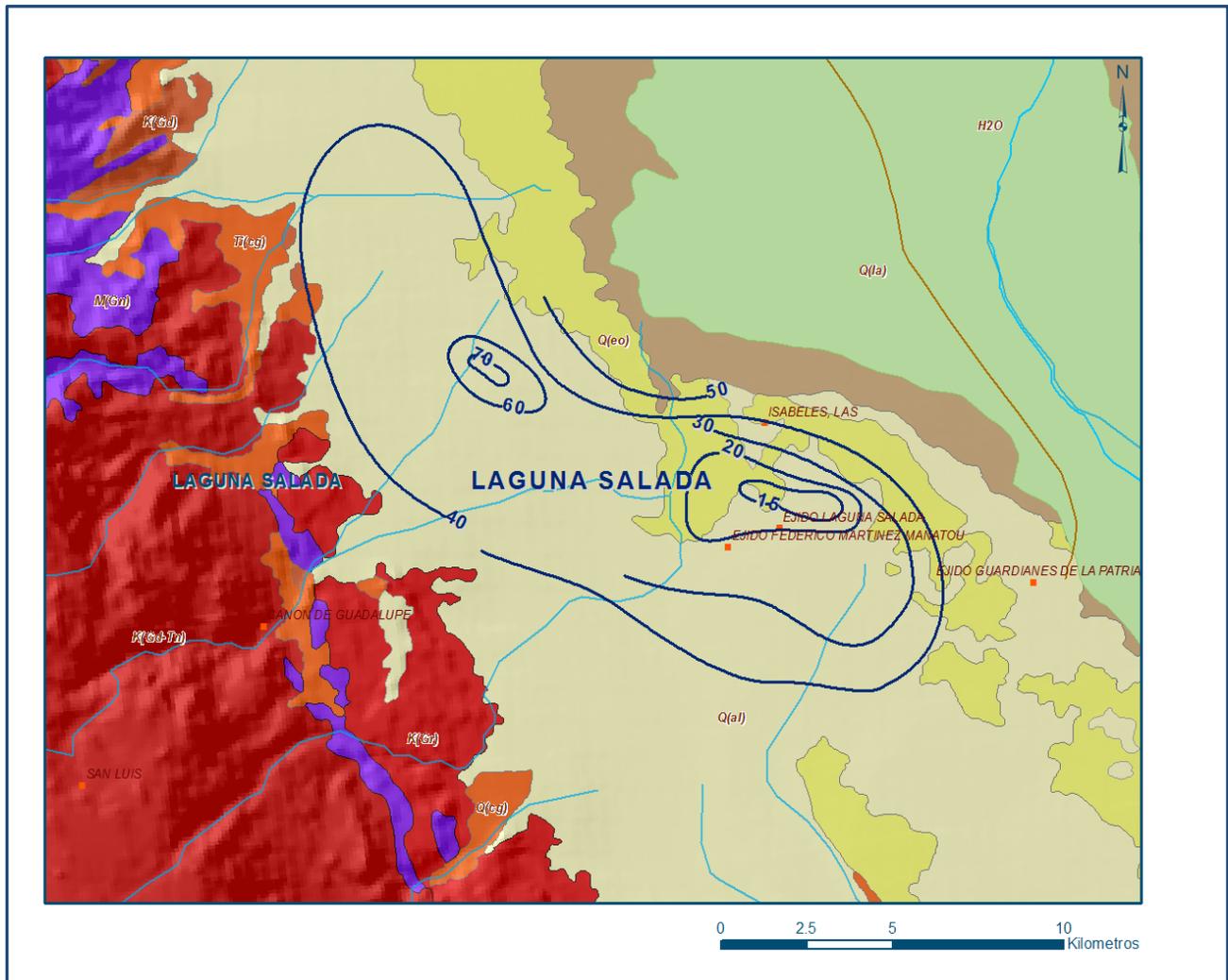


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m, zona norte (2013)

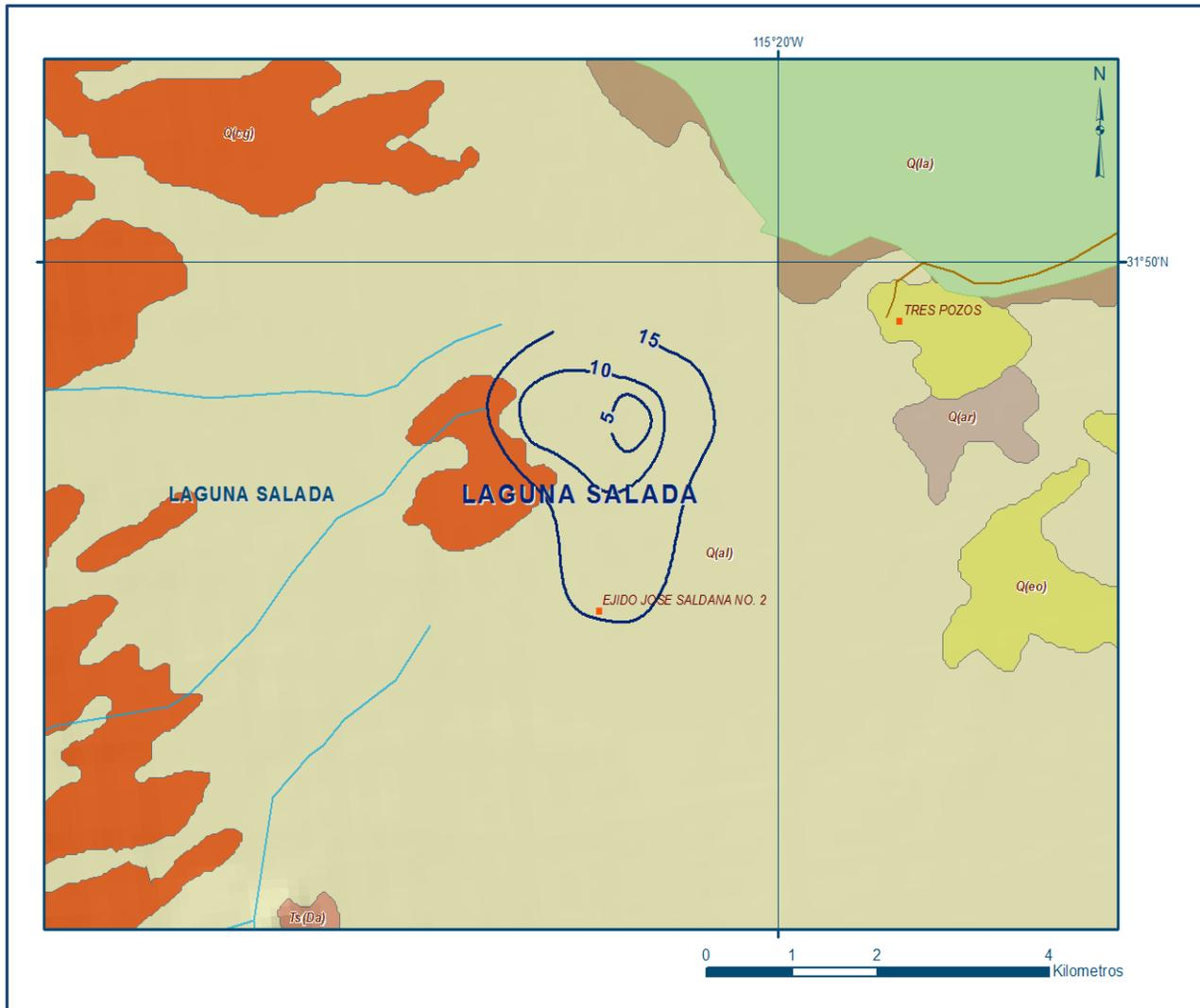


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m, porción sur (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En 2013, se registraron valores de elevación el nivel estático entre 12 y 2 msnm, en la porción norte del acuífero los valores varían de 12 a 3 msnm, cerca de las localidades Ejido Laguna Salada y Rancho Los Laureles del Desierto (figura 6). Los valores van de 4 a 2 msnm cerca del poblado Ejido José Saldaña No. 2 (figura 7).

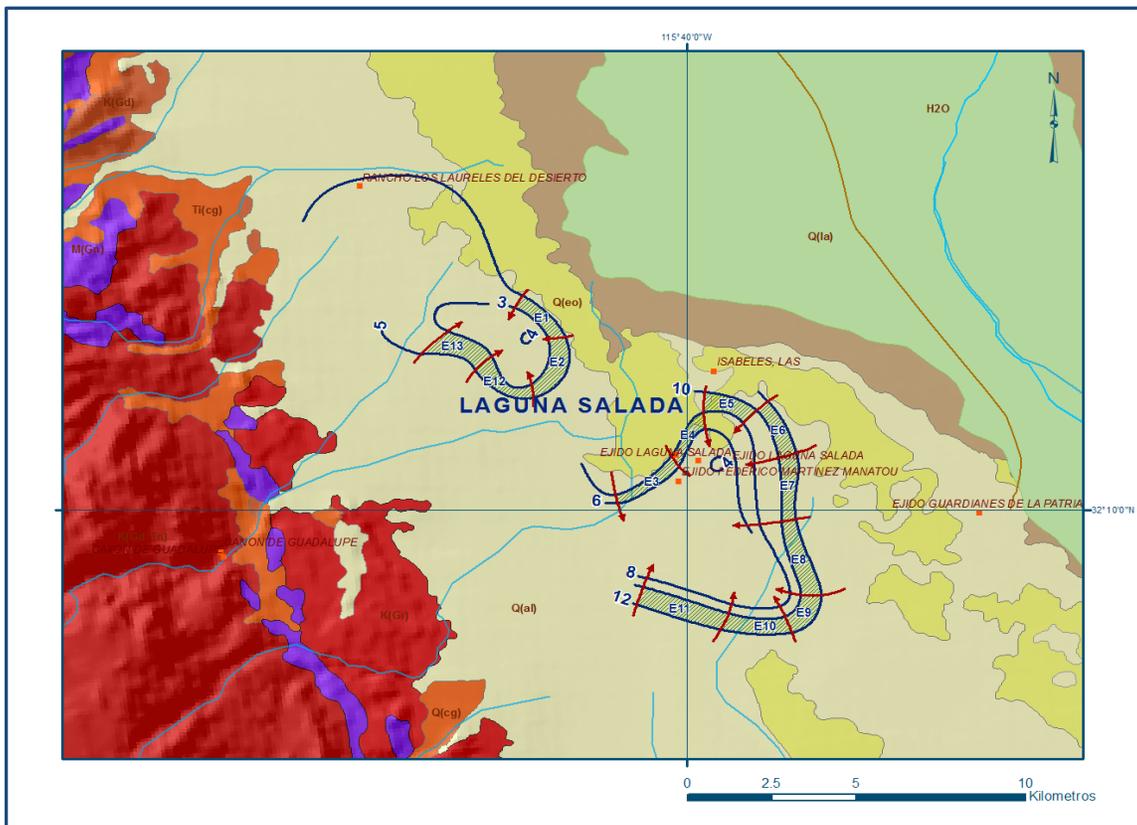


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm, porción norte (2013)

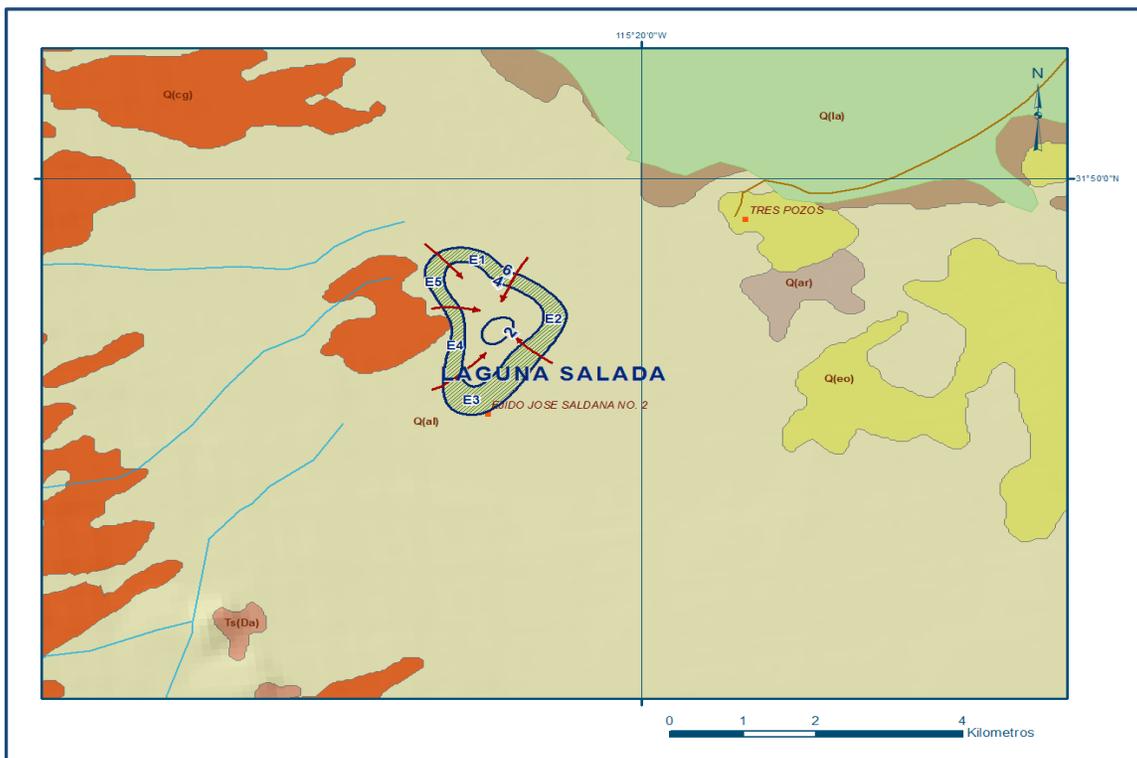


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm, porción sur (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2007-2013, se cuenta con registros únicamente en la porción norte, donde se presentan abatimientos que van de 0 a 8 m, los valores de mayor abatimiento se registran entre las poblaciones Cañón de Guadalupe y Ejido Laguna Salada (figura 8).

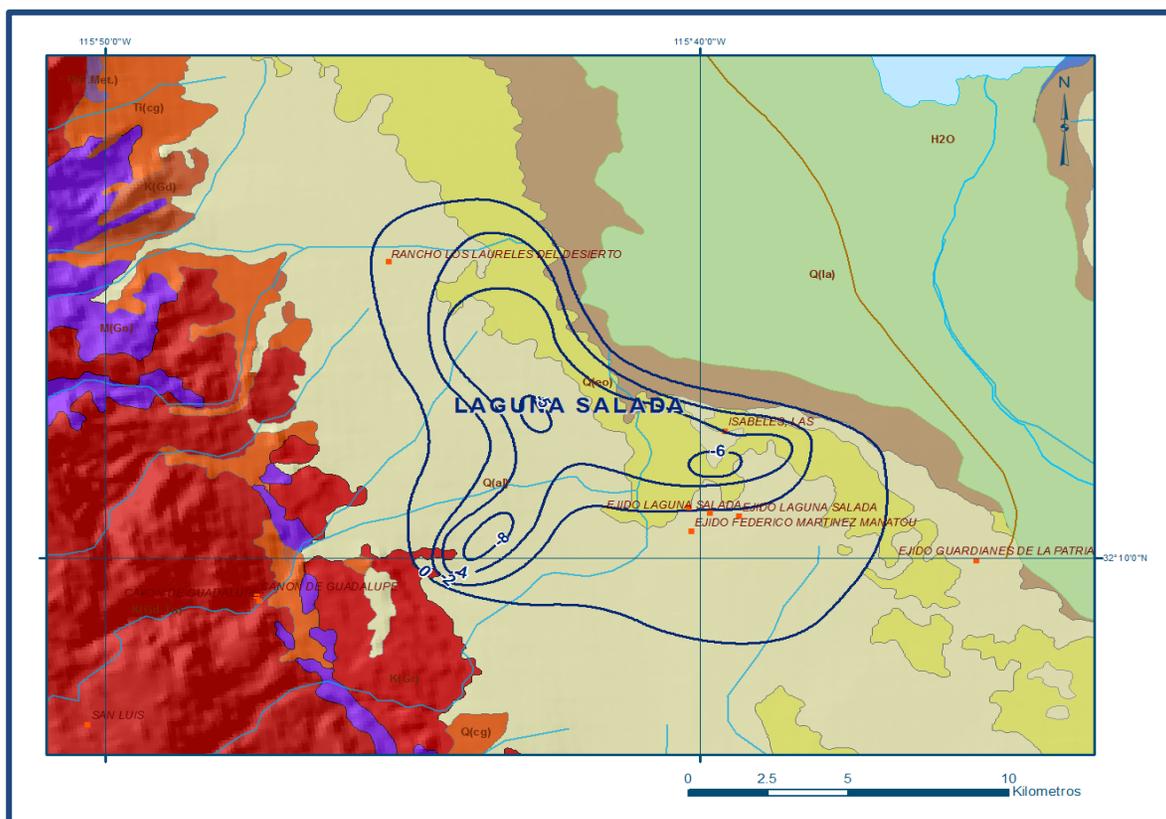


Figura 8. Evolución del nivel estático en m, porción norte (2007-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en 2013, se tomaron 7 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno (pH), dureza y sólidos totales disueltos (STD).

De los resultados de análisis fisicoquímicos se determina que los valores de concentración de STD varían de 220 a 1,070 mg/l. Seis de las siete muestras registran concentraciones de STD menores a 1000 mg/l que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, dos (2) muestras superan el límite máximo permitido para sodio y una (1) supera el límite cloruro.

De la interpretación de los perfiles de conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995); los valores de conductividad varían de 300 a 1,700 $\mu\text{S/cm}$.

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona sur del acuífero; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción occidental del acuífero. Los valores se incrementan gradualmente desde la porción occidental del acuífero hacia la zona oriental, en dirección hacia las partes bajas en la zona del valle. Con respecto a la familia de agua predominante, de acuerdo con los iones presentes, predomina la familia clorurada-sódica y en menor proporción la familia bicarbonatada sódica.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el 2013, se registró la existencia de 74 aprovechamientos del agua subterránea, 60 pozos y 14 norias, del total de pozos, 24 están en operación y 36 se consideran inactivos. De los pozos activos, 13 son para uso agrícola; 2 para uso industrial y 9 uso múltiple (doméstico y pecuario), que en conjunto extraen un volumen de **17.9 hm³**, de los cuales 16.5 hm³ (92.2%) son para uso agrícola, 1.1 hm³ para uso industrial (6.1 %) y 0.3 hm³ (1.7 %) son para uso múltiple.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2007 a 2013, en una superficie de 160 km², que corresponde a la zona norte del acuífero 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 la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del 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 (R_v), la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo horizontal (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Debido a que no existe extracción para uso público-urbano, sólo se considera la recarga por retornos de riego.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con 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 definida por la expresión:

$$R_v + R_r + E_h - B = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Rr: Recarga inducida por retornos de riego

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)

B: Bombeo

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = B - Rr - Eh \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Recarga inducida por retornos de riego (Rr)

Como se mencionó anteriormente, la recarga inducida (R_i) tiene varios componentes, en este caso solo se consideran la infiltración de los excedentes del riego agrícola (R_r). Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Para el cálculo de esta componente, se considera que el 5% del agua aplicada retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, lo cual es consistente con la permeabilidad media a baja de sedimentos del subsuelo y con el hecho de que en la mayor parte de las parcelas el riego es por goteo. De esta manera, tomando en cuenta que el volumen neto de agua aplicado al riego que es de $16.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, del cual se infiltran, como retornos de riego, el 5% corresponde a $0.8 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por lo tanto, **$R_r = 0.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$**

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 6 y 7.

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:

$$Q = B * i * T$$

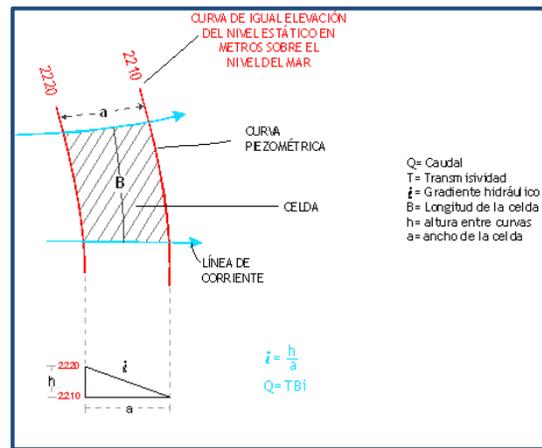
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **10.8 hm³/año**. Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en 2013 y otros previos, adaptados al espesor saturado.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
ZONA NORTE							
E1	1775	420	2	0.00476	0.0020	0.0169	0.5
E2	1900	590	2	0.00339	0.0020	0.0129	0.4
E3	2110	380	2	0.00526	0.0035	0.0389	1.2
E4	1265	420	2	0.00476	0.0025	0.0151	0.5
E5	1435	340	2	0.00588	0.0025	0.0211	0.7
E6	2110	465	2	0.00430	0.0025	0.0227	0.7
E7	2200	505	2	0.00396	0.0020	0.0174	0.5
E8	1945	295	2	0.00678	0.0020	0.0264	0.8
E9	1265	380	2	0.00526	0.0020	0.0133	0.4
E10	2450	420	2	0.00476	0.0020	0.0233	0.7
E11	2535	550	2	0.00364	0.0020	0.0184	0.6
E12	1775	340	2	0.00588	0.0020	0.0209	0.7
E13	1690	465	2	0.00430	0.0020	0.0145	0.5
ZONA SUR							
E1	1130	305	2	0.00656	0.0020	0.0148	0.5
E2	1435	285	2	0.00702	0.0020	0.0201	0.6
E3	1180	410	2	0.00488	0.0020	0.0115	0.4
E4	1130	255	2	0.00784	0.0020	0.0177	0.6
E5	870	230	2	0.00870	0.0020	0.0151	0.5
Total entradas							10.8

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **17.9 hm³/año**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2007-2013 (figura 8).

Con base en esa evolución y considerando un valor promedio del coeficiente de almacenamiento (S_y) de 0.001, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -0.4 hm³, por lo que el promedio anual es de -0.1 hm³.

Tabla 3. Evolución promedio anual (2007-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -2	-1	93.8	0.001	-0.1
-2 a -4	-3.0	25.5	0.001	-0.1
-4 a -6	-5.0	37.0	0.001	-0.2
-5	-5.0	0.7	0.001	0.0
-6	-6.0	1.8	0.001	0.0
-8	-8.0	1.2	0.001	0.0
Área de balance		160.0		-0.4
			Promedio anual	-0.1

Solución de 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 (2), establecida anteriormente:

$$R_v = B - R_i - E_h \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 17.9 - 0.8 - 10.8 - 0.1$$

$$R_v = 6.2 \text{ hm}^3$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 6.2 + 10.8 + 0.8$$

$$R = 17.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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:

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

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 **17.8 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. Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida es de **0.0 hm³/año**.

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 **16,762,916 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 17.8 - 0.0 - 16.762916 \\ \text{DMA} &= 1.037084 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,037,084 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1982. Estudio geohidrológico en las zonas de Laguna Salada, Valle Chico y San Felipe, estado de Baja California, elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. de C.V.