

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LLANOS DEL BERRENDO (0228),
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.....	5
3.1 Provincia fisiográfica	5
3.2 Clima	7
3.4 Hidrografía	7
3.5 Geomorfología	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	18
4.3 Geología del subsuelo.....	20
5. HIDROGEOLOGÍA.....	20
5.1 Tipo de acuífero.....	20
5.2 Parámetros hidráulicos	21
5.3 Comportamiento hidráulico.....	21
5.3.1 Profundidad al nivel estático	21
5.3.2 Elevación del nivel estático	22
5.3.3 Evolución del nivel estático.....	23
5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	24
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	25
7.1 Entradas.....	25
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	26
7.2 Salidas	27
7.2.1 Bombeo (B)	27
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	27
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	28
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1 Recarga total media anual (R).....	29
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
9. BIBLIOGRAFÍA	32

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 Llanos del Berrendo, definido con la clave 0228 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción sur del estado de Baja California. Geográficamente el área se localiza entre los paralelos 28° 00' y 28° 27' de latitud norte y los meridianos 112° 58' a los 114° 05' de longitud oeste, abarcando una superficie de 3,519 km². Colinda al norte con los acuíferos Villa de Jesús María, La Bocana-Llanos de San Pedro y San Rafael-La Palma, al este con El Progreso-El Barril, al oeste con el Océano Pacífico y al sur con los acuíferos Vizcaíno y Paralelo 28, estos últimos del estado de Baja California Sur (figura 1). Geopolíticamente se localiza 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

ACUÍFERO 0228 LLANOS DEL BERRENDO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	113	48	22.5	28	13	38.8	
2	113	37	41.4	28	14	26.6	
3	113	37	22.7	28	13	28.9	
4	113	33	10.6	28	22	25.3	
5	113	30	47.1	28	26	55.0	
6	113	27	35.0	28	26	3.7	
7	113	25	3.6	28	26	13.4	
8	113	22	36.1	28	24	47.7	
9	113	17	6.7	28	19	14.5	
10	113	14	38.3	28	19	51.8	
11	113	9	37.1	28	19	0.3	
12	113	7	55.7	28	19	44.5	
13	113	1	56.3	28	14	21.4	
14	113	3	31.1	28	12	14.8	
15	113	1	40.3	28	9	44.6	
16	113	4	24.0	28	5	45.8	
17	112	57	48.2	27	59	59.8	DEL 17 AL 18 POR EL LIMITE ESTATAL
18	114	12	13.8	28	0	0.0	DEL 18 AL 19 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
19	114	3	59.5	28	13	17.6	
1	113	48	22.5	28	13	38.8	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para 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 es 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 de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso principal del agua subterránea es el doméstico. En el acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

La mayor parte del territorio del acuífero pertenece a la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Valle de los Cirios” decretada el 2 de junio de 1980 y una pequeña parte al suroeste del acuífero pertenece a la Reserva de la Biósfera “Complejo Lagunar Ojo de Liebre”, decretada el 14 de enero de 1972.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios, entre los cuales se encuentran los siguientes:

GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA DEL VALLE DEL ROSARIO EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la empresa GEOFIMEX, S. A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas en 1973. La finalidad fue obtener información sobre las resistividades eléctricas de las diferentes formaciones del subsuelo y de sus espesores, correlacionándolos después con los resultados de perforaciones y extracción de agua en áreas próximas para proporcionar así información hidrogeológica útil.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO 0028 LLANOS DEL BERRENDO, BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la empresa Mexicana del Arco, para la Comisión Nacional del Agua en 2010. En el estudio, se realizaron actividades de recopilación y análisis de información hidrogeológica, actualización del censo de aprovechamientos de agua subterránea; verificación geológica, reinterpretación de trabajos de geofísica realizados con anterioridad, muestreo y análisis de la calidad del agua, interpretación de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos piloto, piezometría, integración e interpretación de resultados para concluir con la determinación de la disponibilidad hidráulica del sistema.

Este estudio fue la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), la zona se ubica en la provincia fisiográfica "Baja California"; el espinazo de esta provincia lo integra la cordillera peninsular que recorre los dos estados peninsulares, cuyo núcleo de granito masivo aflora en el norte y queda sepultado hacia el sur, bajo materiales volcánicos. El conjunto integra a las sierras de Juárez y de San Pedro Mártir en el estado norte. La provincia tiene un origen singular ya que se considera que se encontraba pegada originalmente al resto del continente, del que se fue separando por fuerzas tectónicas, formándose así el Golfo de California.

La península se sigue moviendo hacia el noroeste a un ritmo de 2 a 3 cm por año, aproximadamente.

Tres discontinuidades fisiográficas se presentan en la provincia. La primera es el Desierto de San Sebastián Vizcaíno, cuyos amplios llanos médanos quedan interrumpidos en el occidente por la sierra volcánica del mismo nombre.

La segunda formada por las Sierras de Baja California, a partir de la frontera con los Estados Unidos y hacia el sur, las unidades orográficas de la cordillera son las sierras de Juárez y de San Pedro Mártir. En estas dos sierras se dan las cumbres más elevadas de la cordillera con un máximo de 2,828 msnm en el Picacho del Diablo o Cerro La Encantada, que está enclavado en la sierra de Juárez. Las cimas han sido descritas como de "mesa corrugada", de relieve poco o moderadamente pronunciado y con cuevas marginales que se levantan de 150 a 300 m sobre el piso elevado. La cresta de la occidental es uniforme y la de la oriental es algo dentada, especialmente en la zona de La Encantada. En las cumbres de la sierra de San Pedro Mártir, cuyas altitudes disminuyen lentamente hacia el sur, hay cuevas, valles y algunas praderas intermontanas.

La tercer subprovincia se denomina Sierra de la Giganta, tiene sus inicios al norte del paralelo 28, donde termina la sierra La Libertad. Sus cumbres más elevadas se ubican en el Monte Thetis (1,776 msnm) al sur de Santa Rosalía y el cerro La Giganta (1,766 msnm) cerca de Comondú. Sus altitudes disminuyen gradualmente hacia el sur hasta que en las cercanías de la región del Cabo llegan a ser simples lomeríos.

El hecho de que esta sierra, al igual que las del norte, muestre un costado abrupto al oriente con acantilados sobre el Golfo; que se tienda suavemente hacia el occidente y que las rocas batolíticas vuelvan a aparecer en la región del Cabo, apoyan la idea de que las rocas de la sierra de La Giganta, predominantemente volcánicas, reposan sobre un sepultado bloque batolítico. Las rocas de tipo basáltico dominan en el norte, donde la morfología general es de meseta con cañadas; las del tipo piroclástico (volcánicas fragmentadas) prevalecen en el sur, asociadas con paisaje de llanura con meseta.

Las rocas basálticas se intemperizan con la liberación de bloques de buen tamaño que frecuentemente se observan regados en mantos sobre las laderas.

Este tipo de evolución ha producido la característica morfología de las cimas de la sierra. Los sistemas de topoformas que imperan en la subprovincia son, gran sierra con mesetas, que es propiamente el eje de la zona, así como pequeños valles y bajadas con lomeríos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García, para las condiciones de la República Mexicana, los tipos de clima que predominan en el área del acuífero son secos y extremosos.

Las lluvias son escasas en la mayor parte del estado. La presencia de altitudes importantes a lo largo de la cadena montañosa de Juárez y San Pedro Mártir condiciona climas templados y semifríos, ambos subhúmedos en las cimas y mesetas altas. Una característica relevante de la climatología peninsular es la presencia en toda su porción central y occidental y al oeste de las laderas orientales de las mencionadas sierras, de climas secos cuyos regímenes de lluvias son invernales.

Tal distribución de lluvias afecta también a los climas templados y de las cumbres serranas y a los muy secos, excepto los de la costa del Golfo de California. Con la información de nueve estaciones cercanas al área del acuífero con registros de precipitación, se obtuvo un promedio de **79.26 mm anuales**; para la temperatura media anual, se determina un valor de **19.9° C** y para la evaporación **2,154 mm anuales**.

3.4 Hidrografía

El acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica Número “Baja California Centro-Oeste”, Cuenca B “San Miguel-Arroyo del Vigía”.

La mitad de esta cuenca corresponde a Baja California, y sólo tiene dos corrientes de poca importancia debido a la escasa lluvia anual. La corriente del arroyo Paraíso se origina en la sierra de San Borja y de Calmalli, su cauce se dirige hacia el suroeste y se prolonga hasta muy cerca del litoral al que no llega por una barrera arenosa cercana al morro de Santo Domingo, la corriente del arroyo San Luis es de menor importancia pero se menciona por ser el último cauce definido dentro del estado; esta posee 70 km de longitud y su parte baja no está definida, pues su cauce no alcanza el litoral y se pierde 5 km antes de llegar al Océano Pacífico.

Las subcuencas intermedias que la forman son: Laguna Scammon (2BB), Las Lagunas (2BC), Arroyo Piñami (2BD), Arroyo San Luis (2BE), Arroyo Paraíso (2BF) y San Miguel (2BG).

3.5 Geomorfología

La primera geoforma, conforma un relieve dentro del ciclo geomórfico de madurez avanzada a senil con un terreno casi plano formado por el llano El Berrendo y la segunda se caracteriza por presentar un relieve dentro del ciclo geomórfico de madurez avanzada a rejuvenecimiento, constituidas las partes elevadas por volcanes y mesetas del Mioceno y Plioceno, además algunos altos topográficos formados por rocas intrusivas del Cretácico. Las elevaciones van de 180 a 820 msnm.

La red hidrográfica en las sierras es de tipo dendrítico a rectangular, obedeciendo al control estructural de la zona y vertiendo sus aguas hacia la costa del Océano Pacífico, en los valles se presentan materiales generados a partir de la erosión y en la zona plana desértica la red hidrográfica es de paralela a semiparalela, siendo el principal drenaje el arroyo San Luis.

4. GEOLOGÍA

El área está formada por una gran variedad de rocas. Sobresalen por su importancia las del tipo ígneo y siguen en ese orden las sedimentarias y las metamórficas. Dentro de las ígneas dominan las de origen intrusivo y en menor medida las volcánicas, ambas se distribuyen ampliamente a lo largo de la entidad. Las rocas sedimentarias son también variadas, pero es posible distinguirlas según su origen; las continentales que dominan como relleno de valles, fosas tectónicas y las marinas.

Las rocas metamórficas se presentan en varios afloramientos, generalmente asociados a rocas graníticas, a las cuales deben parte de su origen (figura 2).

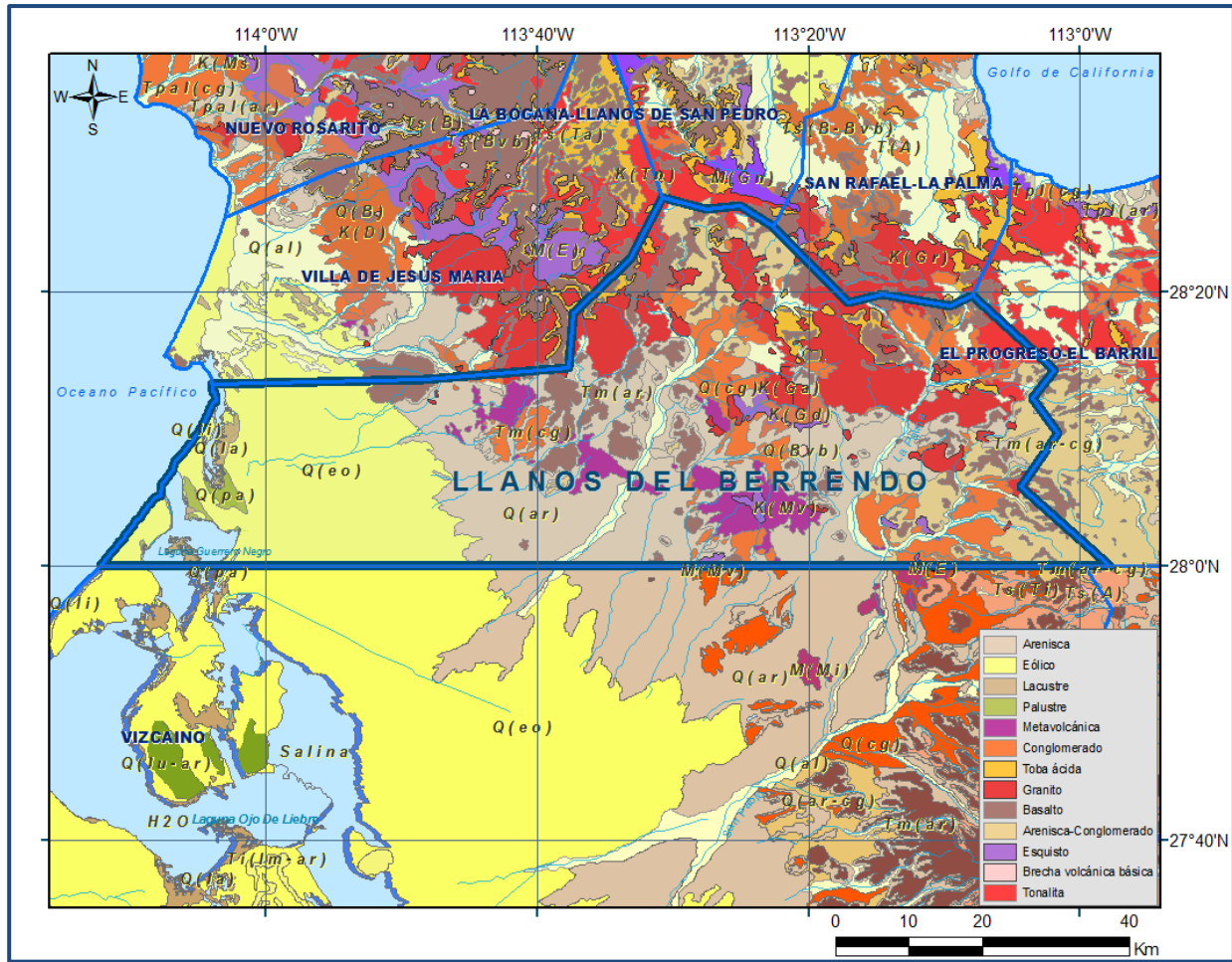


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En el área afloran rocas que van desde el Mesozoico hasta el Reciente.

ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS

Tonalita K(Tn). Esta unidad representa a tonalitas, generalmente de biotita y hornblenda de textura holocristalina equigranular, algunas porfídicas. Las tonalitas son de color gris claro con tonos de rosa y presentan intemperismo esferoidal, en algunos sitios presentan xenolitos. La unidad está expuesta conforme a una franja de orientación sureste-noroeste, en donde aparece emplazada, en forma de batolitos, en las rocas metamórficas y cubierta, discordantemente, por rocas clásticas y volcánicas del Paleógeno-Neógeno. En algunos sitios la unidad se encuentra intrusionada por “troncos” de diferentes composiciones y por diques, algunos de textura aplítica.

La unidad constituye sierras prominentes con grandes peñascos redondeados, entre las sierras que destacan: Las Ánimas y La Libertad.

Granito K(Gr). La unidad consiste de granitos, algunos de biotita, de color gris claro con tonos verdes y que intemperizan en color gris con color rojo; los granitos tienen texturas holocristalina equigranular.

Diorita K(D). Esta unidad representa a dioritas y melanodioritas de textura holocristalina y equigranular en algunos sitios, presenta diques de composición ácida. La unidad forma “troncos” emplazados en las rocas metamórficas y en los intrusivos, principalmente en las tonalitas. Sus afloramientos en la zona se encuentran en la porción occidental, en Rancho Alegre, donde aparece cubierta parcialmente, por las rocas clásticas del Paleógeno-Neógeno y por las rocas clásticas, tanto Paleógeno-Neógenas como cuaternarias. La expresión morfológica de la unidad es de cerros redondeados.

Gabro K(Ga). Gabros de textura holocristalina equigranular, algunos de olivino de color gris oscuro en roca fresca y gris con tonos de café en roca intemperizada. La unidad se presenta como “troncos” que intrusionan a las tonalitas y a los granitos; y forman cerros con bloques redondeados. El área de afloramiento de la unidad se localiza, en la porción central del área, en el poblado Las Palomas.

Granodiorita K(Gd). Esta unidad consiste de unas granodioritas de textura holocristalina y equigranular, con minerales accesorios de apatito, esfena y de hornblenda. Las granodioritas son de color gris claro. La unidad aparece emplazada en forma de “troncos”, en las rocas metamórficas, en las tonalitas y en los granitos, generalmente en la periferia de los batolitos. Afloran en la porción noroeste y noreste de la zona. La morfología de esta unidad es de montañas y cerros con formas redondeadas.

ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS

Andesita Ts(A). Esta unidad consiste de andesitas de lamprobolita; se presenta con pequeñas vesículas. La unidad se encuentra muy fracturada y aflora en la parte noreste y sureste de la zona. Forma cerros de mediana altura.

Toba ácida Ts(Ta). Esta unidad representa a una secuencia piroclástica de composición silíceea que incluye tobas líticas, tobas cristalinas, tobas arenosas y algunas ignimbritas; la unidad presenta colores, gris y rosa en las rocas inalteradas y color rosa con tonos de café en las rocas intemperizadas. La secuencia presenta diversos grados de compactación, es posible encontrar rocas muy deleznales y otras muy tenaces. Algunas tobas líticas presentan clastos de pumicita hasta de 4 cm de diámetro.

Aflora al noreste de la zona y está cubierta por derrames de basaltos, en algunos lugares más al noreste del área, en la sierra Agua de Soda, el espesor de esta unidad llega a medir hasta 150 m.

Basalto Ts(B). La unidad consiste de basaltos de olivino, basaltos de lamprobolita, con textura holocristalina, intergranular y porfídica de color gris oscuro con tonos de rojo. En algunos sitios los basaltos se presentan compactos y en otros vesiculares. Esta unidad incluye algunos derrames de andesitas basálticas. La unidad yace sobre los piroclásticos ácidos y sobre los depósitos areno-conglomeráticos del Mioceno que constituyen a la Formación Comondú.

Los basaltos están ampliamente distribuidos en la región, principalmente en la zona este-noroeste del área en forma de derrames, algunas acordonadas y otras en forma de bloques. Los derrames se encuentran coronados por pequeños conos cineríticos. La expresión morfológica de la unidad es principalmente de mesetas.

Brecha volcánica básica Ts(Bvb). Unidad constituida por fragmentos piroclásticos de composición básica dispuestos en pseudoestratos. Los piroclásticos son: bloques, bombas y cenizas. Las brechas presentan color gris oscuro con tonos de rojo. La unidad aflora en la parte noroeste de la zona, en forma de pequeños conos cineríticos sobre los derrames de basaltos.

Basalto-Brecha volcánica básica Ts(B-Bvb). Esta unidad representa a una alternancia de basaltos y de pseudoestratos de brechas volcánicas básicas. Algunos basaltos son de olivino y otros de lamprobolita.

Los pseudoestratos de brecha están constituidos por bloques de basalto en una matriz de ceniza. Forma lomeríos y cerros aislados. La unidad cubre discordantemente a la unidad de tobas y está cubierta por basaltos paleógeno-neógenos y arenas eólicas.

Toba intermedia Ts(Ti). La unidad consiste de tobas líticas con fragmentos de minerales de plagioclasa y lamprobolita. Las tobas presentan variación en su composición desde ácidas hasta básicas. Estas tobas cubren discordantemente a los granitos cretácicos y están cubiertas por los basaltos del Neógeno.

Toba intermedia-Brecha volcánica intermedia Ts(Ti-Bvi). Alternancia de tobas y brechas intermedias.

Las tobas son arenosas con líticos máficos menores de 2 cm; las brechas están constituidas por fragmentos angulosos y subredondeados andesíticos y dacíticos hasta de 1 m de diámetro, los fragmentos aparecen en una matriz tobácea. Hacia la base de la unidad las brechas son más abundantes. La unidad presenta una morfología de montañas y cerros escarpados.

Brecha volcánica intermedia Ts(Bvi). Esta unidad representa a rocas piroclásticas y vulcanoclásticas constituidas principalmente por líticos de andesita angulosa y subangulosos y por minerales de plagioclasa, lamprobolita y piroxenos alterados. Las brechas volcánicas intermedias son más abundantes en el sureste de la zona. Los depósitos vulcanoclásticos son más deleznales que las brechas.

La unidad incluye algunos horizontes arenosos y conglomeráticos, y esporádicos derrames de andesita o de basalto. Este conjunto aparece pseudoestratificado y con una ligera pendiente hacia el occidente; cubre a las areniscas continentales. La unidad presenta una morfología de sierras.

Basalto-brecha volcánica básica Q(B-Bvb). Basaltos de olivino que alternan con brechas volcánicas, compuestas por fragmentos angulosos de basalto, lapilli, escorias y bombas. Presentan una estructura masiva y en ocasiones con pseudoestratificación, cubre a los basaltos del Neógeno. Su expresión morfológica es de conos bien definidos y algunos derrames de cortas dimensiones.

Brecha volcánica básica Q(Bvb). Esta unidad representa a los conos cineríticos del Cuaternario y está constituida por bloques y bombas, hasta de 20 cm de diámetro, en una matriz de ceniza.

Las brechas incluyen piroclastos escoráceos y tienen un color rojo oscuro con tonos de ocre, en el área, afloran en el Cerro Colorado, sobreyaciendo a las areniscas del Cuaternario.

Basalto Q(B). La unidad está constituida por basaltos de piroxeno, con textura afanítica holocristalina, intergranular. Algunos basaltos son vesiculares.

Los basaltos forman derrames acordonados y de bloques, y cubren en forma discordante, a las rocas cretácicas y paleógeno-neógenas, principalmente a los basaltos del Neógeno, subyacen a unos pequeños conos cineríticos de brecha volcánica básica.

Esta unidad tiene una morfología de mesetas. Esta unidad presenta escasos afloramientos en el área, observándose únicamente en la porción noroeste, a 8 km al norte del rancho San Jerónimo.

ROCAS SEDIMENTARIAS

Arenisca Tpal(ar). La unidad consiste de areniscas de grano fino a medio, cementadas por carbonatos, en estratos medianos y gruesos. La unidad incluye algunos horizontes de limolitas y algunos lentes de conglomerado. Las areniscas presentan un intemperismo diferencial. La unidad se depositó en un ambiente marino cercano a costa y en un ambiente continental, en la secuencia marina se presentan estratos con abundantes fósiles.

Estas areniscas afloran en la parte occidental de la zona. La unidad sobreyace, en forma discordante, a los intrusivos cretácicos y subyace en forma discordante, a la unidad clástica del Mioceno; además subyace, en aparente concordancia, a la unidad conglomerática del Paleoceno. La expresión morfológica de la unidad es de lomeríos.

Conglomerado Tpal(cg). Conglomerados polimícticos formados por clásticos de rocas ígneas, de metamórficas y algunas sedimentarias en estratos gruesos y masivos.

Los clásticos son de subredondeados a bien redondeados y presentan diámetros de hasta 30 cm. Los conglomerados tienen matriz arenosa y están cementados por carbonatos. La unidad se acumuló en un ambiente litoral.

La unidad sobreyace, en aparente concordancia a las areniscas del Paleoceno y subyace, discordantemente, a la unidad arenosa del Mioceno. Estos conglomerados, al igual que las areniscas que cubre, pueden representar parte del Eoceno. La unidad tiene una expresión morfológica de mesas con bordes redondeados y presenta una disección moderada, aflorando hacia la parte oeste de la zona.

Arenisca Tm(ar). La unidad consiste de arcosas y litarenitas de color crema con tonos de ocre; las areniscas fueron depositadas, en un ambiente continental y son de grano medio a grueso, tienen una redondez de sub redondeadas a bien redondeadas y están cementadas por carbonatos. Las areniscas se presentan en estratos medianos a gruesos, algunas presentan estratificación cruzada y otros nódulos calcáreos. Esta unidad aflora en la porción centro sur de la zona. Las areniscas subyacen en forma discordante a los basaltos, a la secuencia areno-conglomerática del Mioceno y a los depósitos clásticos recientes. La expresión morfológica de la unidad es de lomeríos.

Arenisca-Conglomerado Tm(ar-cg). Esta unidad está constituida por una secuencia continental areno-conglomerática que incluye algunos horizontes de limolitas y algunos paquetes delgados de rocas extrusivas. Las areniscas predominan en su parte inferior, los conglomerados en la parte superior. Esta secuencia se presenta en estratos medianos, gruesos y masivos. La unidad presenta colores crema y gris con tonos de rojo y verde.

Las areniscas son litarenitas de grano medio a grueso cementados por carbonatos y por óxidos. Los fragmentos líticos de las arenas son de rocas volcánicas; entre los fragmentos de minerales destacan los de cuarzo y los de feldespato, algunas areniscas presentan estratificación cruzada. Los conglomerados son polimícticos, sus clásticos son de andesitas, de basaltos y de rocas ígneas intrusivas, están bien redondeados y tienen diámetros de hasta 30 cm. Los conglomerados tienen matriz arenosa y en ocasiones presentan matriz de ceniza volcánica con evidencias de transporte.

Los afloramientos en el área se localizan en la parte norte y centro sur. Esta unidad forma sierras escarpadas y disectadas por profundos cañones.

La unidad yace, en forma discordante, sobre las rocas mesozoicas y sobre las areniscas miocenas, está coronada por derrames de basalto. En La Misión de Santa Gertrudis, la unidad es la que abastece al manantial del lugar.

Conglomerado Tm(cg). Conglomerados polimícticos, con clastos de andesitas, basaltos y rocas ígneas intrusivas, bien redondeados, con diámetros de hasta 30 cm. Presenta coloración rojiza, se encuentra pobremente cementado y es de escasa distribución en la zona.

Arenisca Tpl(ar). Litarenitas de origen marino. La unidad tiene color crema y se presenta en estratos gruesos y masivos, constituidos por arenas subredondeadas de grano grueso. Las arenas son de cuarzo, feldespatos y líticos, están cementadas por carbonatos.

La unidad presenta algunos lentes conglomeráticos y contiene conchas de pelecípodos y de gasterópodos y dientes de tiburón; además, presenta icnofósiles y vetillas de calcita. Esta unidad aflora en la costa del Golfo de California, en la Bahía de San Rafael, sobreyace, discordantemente, a las rocas intrusivas y a las metamórficas, está cubierta, en igual forma, por los depósitos cuaternarios. La unidad tiene una expresión morfológica de terrazas y lomeríos.

Conglomerado Tpl(cg). Esta unidad está constituida por conglomerados de origen marino, que se presentan en forma masiva, en la costa del Golfo de California. Los conglomerados están constituidos, principalmente, por clastos de rocas intrusivas y extrusivas con tamaños hasta de 10 cm de diámetro, presentan matriz arenosa y están cementados moderadamente por carbonatos.

La unidad presenta color crema y contiene algunos fósiles, mal preservados, y presenta algunas vetillas de calcita. Estos conglomerados cubren, discordantemente, a los intrusivos y a la secuencia, eminentemente clástica, del Mioceno y están cubiertos por los depósitos clásticos recientes. La unidad tiene una morfología de terrazas y lomeríos.

Arenisca-Conglomerado Q(ar-cg). Esta unidad incluye depósitos marinos y continentales.

Los primeros están formados por areniscas fosilíferas de grano fino, interestratificadas con conglomerado polimíctico, el cual está compuesto por clastos de rocas volcánicas intermedias y básicas, de tamaño de grava y esporádicamente, bloques; el predominio de fósiles es tal en algunos sitios, que se considera como coquina.

Los materiales de origen continental son arena, grava y conglomerado, constituidos generalmente por fragmentos de rocas volcánicas, redondeados a subredondeados. La arena es de grano fino, mal clasificada. Esta unidad sobreyace a los depósitos areno-conglomeráticos de la Formación Santa Rosalía. Sus afloramientos son aislados y diseminados, su morfología es de lomas suaves.

Conglomerado Q(cg). Conglomerados polimícticos de color crema con tonos de café, están constituidos por clásticos subredondeados con tamaños de hasta 20 cm de diámetro en una matriz arenosa y están cementados por carbonatos.

Los clásticos son de rocas ígneas destacando los de basaltos. La unidad se depositó en un ambiente continental y presenta lentes delgados de arenisca. Los conglomerados forman terrazas y lomeríos.

Areniscas Q(ar). Es la unidad más abundante, y aparece con espesores de más de 300 m, sobreyace a la unidad de areniscas del Paleógeno-Neógeno T(ar).

Estas areniscas son de grano grueso y conglomeráticas, se presentan en estratos gruesos y masivos mal definidos. Los clásticos son de rocas y de minerales; entre los líticos destacan los de rocas intrusivas y metamórficas, y entre los de minerales, los de cuarzo y feldespatos.

Los fragmentos son subredondeados y subangulosos, en ocasiones, están cementadas pobremente. La unidad cubre, discordantemente, a las unidades más antiguas, en algunos sitios, está cubierta en forma discordantemente, por los conglomerados del Cuaternario y por las arenas eólicas.

ROCAS METAMÓRFICAS

Gneis M(Gn). Esta unidad consiste, principalmente de ortogneises y presenta texturas lepidoblásticas y, en ocasiones augengnéisicas.

Los gneises son por lo general, de facies esquistos verdes y de clase cuarzo-feldespática, algunos son de subfacies de biotita. La unidad presenta, en superficie fresca, bandas de color gris, café y verde con tonos de amarillo, en superficie intemperizada, presenta tonos de ocre.

La unidad presenta numerosas vetillas lenticulares de cuarzo y calcita, y está afectada por diques de composición ácida y por algunas pegmatitas. La unidad en el área, aflora en la porción norte por el valle La Bocana y al este cerca de la costa de la Bahía San Rafael.

Estos están muy relacionados con los batolitos y contrastan notablemente con los intrusivos por su color más oscuro y por sus formas subangulosas. La unidad es la roca encajonante de mineralización hidrotermal.

Esquisto M(E). Unidad constituida por esquistos de facies esquistos verdes, algunos de subfacies de biotita. Los esquistos son de diferentes clases básica, calcárea pelítica y en ocasiones cuarzo-feldespática y tienen textura lepidoblástica y granoblástica. La unidad presenta una foliación orientada hacia el noroeste y está afectada por diques de composición ácida. Los esquistos son de color verde con tonos de ocre. La unidad está distribuida conforme a una franja de orientación sureste-noroeste, en la porción occidental, ahí aparece intrusionada por los “troncos” y los batolitos, y cubierta, discordantemente, por las rocas clásticas del Mioceno y por las volcánicas, tanto del Paleógeno-Neógeno como del Cuaternario. La morfología de esta unidad es de montañas, con bordes angulosos, cubiertos por lajas lustrosas.

Metaintrusiva M(Metaintrusiva). Esta unidad representa a rocas intrusivas con metamorfismo incipiente de facies esquistos verdes de clorita; que presentan textura granoblástica y color gris con tonos verdes. El prototipo se identificó como diorita, sienita y pórfido latítico. Los minerales característicos de estos metaintrusivos son la epidota, clorita y sericita. La unidad presenta una morfología de cerros con crestones alineados hacia el noroeste, como un reflejo de la foliación general.

Metavolcánica K(Metavolcánica). Esta unidad representa a una secuencia volcánica, de dominio de arco insular, metamorfoseada en forma incipiente, se observa sobreyaciendo a rocas intrusivas que fueron las que proporcionaron el calor para el metamorfismo de ésta.

La secuencia varía en composición desde ácida hasta intermedia, con predominio de esta última. La unidad presenta metamorfismo de bajo grado, facies esquistos verdes de clorita, clase básica. En la unidad son frecuentes los colores grises, verdes y amarillos con diversas tonalidades.

El grado de metamorfismo permite identificar a las rocas parentales de la unidad; así se pueden identificar andesitas, tobas intermedias y rocas volcanosedimentarias. Las andesitas presentan texturas holocristalinas y merocristalinas porfídicas. Las tobas son líticas, las rocas volcanosedimentarias tienen características de roca piroclástica y de pelítica, generalmente presentan calcita y sílice como cementante.

La secuencia presenta abundante epidota y, en algunos sitios, se encuentra intrusionada por diques de composición ácida; además está intensamente fracturada. La unidad es la roca encajonante del batolito de granito y está cubierta, en forma discordante, por las diferentes unidades clásticas y por los basaltos del Neógeno. Bajo la cubierta conglomerática del Cuaternario, está intrusionada por un pórfido cuprífero (Mina El Arco). La unidad aflora con una morfología de sierras acordonadas con bordes subangulosos.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente se presenta un dominio antiguo en sentido NW-SE manifestado principalmente en las rocas de la Formación Alisitos, en las rocas sedimentarias y parcialmente vulcanoclásticas con una deformación dúctil y en rocas volcánicas de esta formación se comporta como deformación frágil, constituyendo superficies con esquistosidad de la facies de esquistos verdes. Estas estructuras presentan movimientos compresivos.

Existen algunas otras estructuras que por su antigüedad se han cubierto parcialmente por materiales producto de la erosión presentándose principalmente en los flancos al norte de las sierras bajas (sierrita Pelo de Tierra y El Venteado) de edad Mesozoico.

Hay un segundo fallamiento presente, en sentido casi N-S que corta parcialmente a las fallas, estos movimientos son distensivos y en apariencia cortan a rocas del Mioceno.

El tercer tipo de fallas tiene un rumbo NE-SW como la falla Calmallí y algunos otros rasgos que denotan la presencia de fallas parcialmente cubiertas por materiales post-cretácicos, considerándose a este tipo de movimientos distensivos generados por la apertura del Golfo de California con una edad de Paleógeno y asociados a las fallas transformes de la regionalmente conocida falla San Andrés.

Se presenta una deformación cataclástica compresiva, generando una deformación de tipo dúctil en las rocas metasedimentarias de la Formación Alisitos y una deformación frágil en las rocas volcánicas de la misma formación, en este evento se generaron estructuras como pliegues y fallas inversas o cabalgaduras de rumbo N50° a 85°W con inclinación de 50° a 84° al NE, milonitizadas y parcialmente mineralizadas.

En los intrusivos los curvilineamientos circulares son muy notables presentando estos rumbos. Todo este evento compresivo fue ocasionado por efecto de la orogenia Laramide en el Cretácico Superior. En un lapso de casi 40 Ma (?) no hay registro geológico en la zona hasta el fallamiento tensional en sentido NE-SW, provocado posiblemente por la acción de la apertura del Golfo de California, iniciada en el Mioceno Inferior.

El siguiente evento es la depositación de las areniscas epiclásticas con estratificación cruzada, quizá no concluía la depositación de las areniscas cuando inició el siguiente evento geológico estructural de importancia, que se manifestó en el Mioceno Superior-Plioceno, y éste consistió en una etapa de vulcanismo posiblemente asociado a la apertura del Golfo de California.

Las primeras emisiones fueron de tipo piroclástico ácido, seguido de emisiones piroclásticas intermedias hasta los primeros derrames basálticos del Mioceno Superior. El vulcanismo se alojó en fallas o fracturas de rumbo NW-SE paralelo a las fallas principales de la regionalmente conocida Falla San Andrés.

Existe otro emplazamiento de aparatos volcánicos parcialmente desorganizado con rumbo NE-SW, asociándose al sistema de fallas transformes de la misma Falla San Andrés, concluyendo con el depósito del conjunto de materiales coluviales y volcánicos del Plioceno.

La zona se encuentra afectada por dos fenómenos estructurales que la controlan y limitan: los plegamientos que perturbaron a las rocas sedimentarias de la región y las fallas y fracturas que se encuentran afectando a las rocas del Paleógeno-Neógeno y mesozoicas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la geología el acuífero está constituido, en su porción superior, por depósitos aluviales y conglomerados, que se restringen al cauce de los arroyos y la planicie costera; en la zona existe un predominio de depósitos de origen cuaternario que están constituidos principalmente por arenas (Q(ar)), o depósitos del Paleógeno-Neógeno constituidos además de arenas, también por clastos de mayor tamaño (Tm(ar-cg)). En la porción inferior se aloja en areniscas y conglomerados que presentan fracturamiento. Los sedimentos aluviales y eólicos son los que actualmente se explotan.

El basamento en el valle está constituido por una roca ígnea extrusiva compacta identificada como andesita que se encuentra a profundidades variables y en ocasiones mayores de 300 m. Rocas ígneas intrusivas y metamórficas por su naturaleza poco permeable o impermeable, constituyen barreras al flujo del agua subterránea y parte del basamento.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información hidrogeológica existente, es posible identificar la existencia de un acuífero somero de **tipo libre**, alojado en los sedimentos permeables compuestos de materiales aluviales, arenisca y conglomerados fundamentalmente, es el material de relleno del valle y el acuífero tiene lugar a partir de la superficie freática que alcanza profundidades muy variadas que van desde unos cuantos metros en las proximidades de la zona de costa hasta profundidades del orden de 100 m en la zona del arroyo San Luis. De acuerdo con resultados de la interpretación geofísica y de la información litológica de las perforaciones exploratorias y de los pozos de explotación, la base del acuífero en el valle tiene una profundidad media de 250 m, llegando hasta valores de 400 m.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se realizaron pruebas de bombeo. De acuerdo con los resultados, los pozos ubicados en la zona de San Luis tienen espesores saturados de columna de pozo desde 90 m (pozo San Luis 113) hasta 290 m (pozo Arco 1), con un promedio de 173 m de espesor, que aplicado al promedio de transmisividad de **0.0007 m²/s** para esa zona, podemos asignar a esta unidad un valor medio de conductividad hidráulica de **4.038 x10⁻⁶ m/s**.

El otro grupo de pozos, de los cuales se reinterpretaron las pruebas de bombeo, definen en la zona de Miraflores y la parte norte de Baja California Sur, donde se ubican los pozos denominados Arex, con espesores saturados de columna de pozo desde 96 m (pozo 5M-312) hasta los 289 m, con un promedio de 198 m de espesor saturado, que al usarlo para dividir la transmisividad promedio de **0.001398 m²/s**, nos da como resultado una permeabilidad promedio de **6.934 x10⁻⁶ m/s** para dicha zona.

5.3 Comportamiento hidráulico

5.3.1 Profundidad al nivel estático

En 2010 los valores de profundidad del nivel estático varían de 10 a 80 m. Se distinguen tres zonas; en la porción oeste cerca de la costa, las profundidades varían de 10 m en San Isidro a 80 m en la Colonia Paraíso y aumentan hacia las zonas topográficamente más altas. La segunda zona cerca del Arroyo San Luis muestra niveles entre 80 y 100 m. La tercera zona, en Llano Mesa Prieta (entre el poblado El Arco y Miraflores) las profundidades van de 40 a 90 m (figura 3).

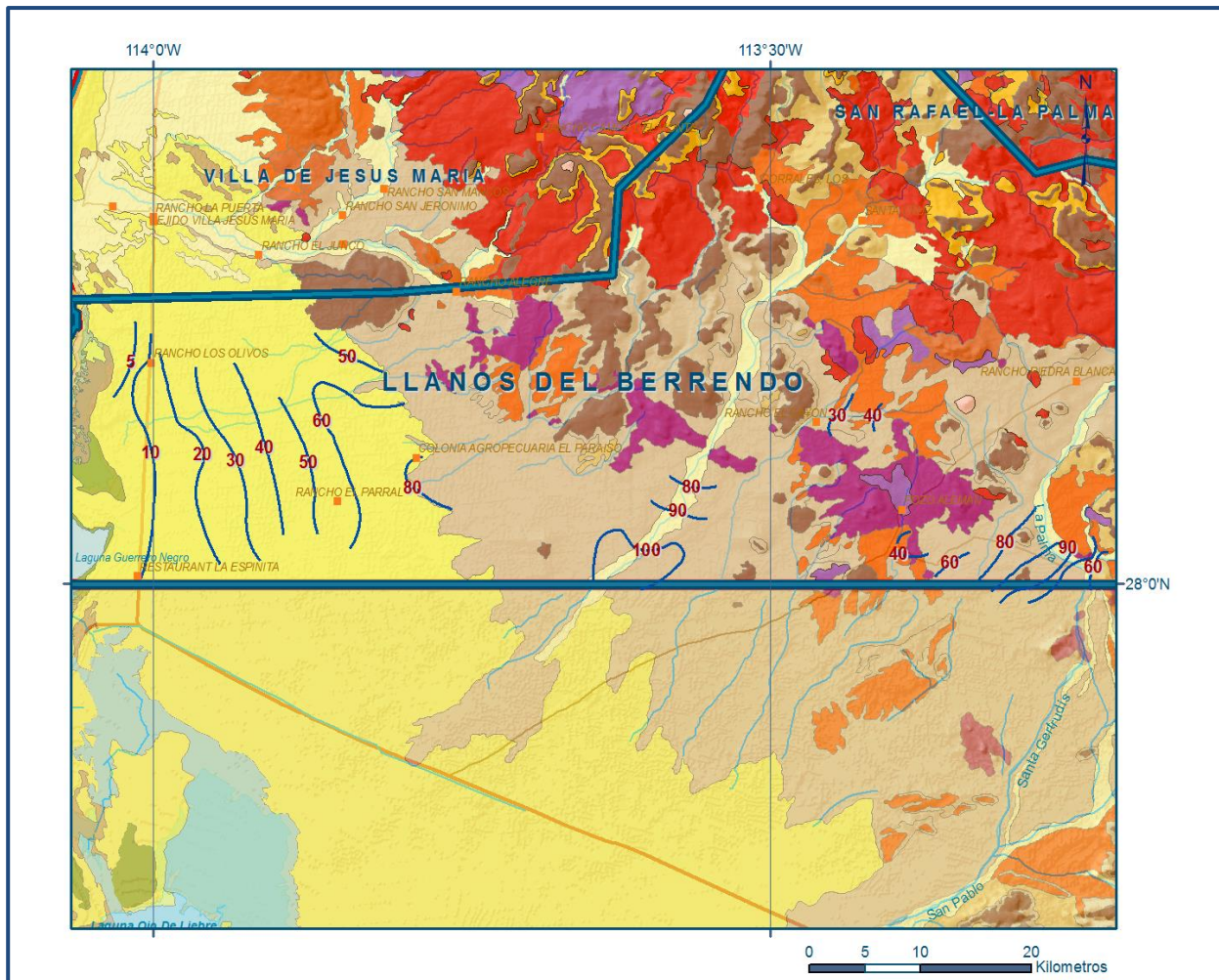


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.3.2 Elevación del nivel estático

Los valores de la elevación del nivel estático, al igual que los de profundidad, muestran el efecto de la topografía.

Los valores más altos, 450 msnm, se encuentran en la porción central del acuífero, cerca del poblado La Unión y van descendiendo hacia la zona de valles, donde las elevaciones varían de 100 msnm hasta 2 msnm en la porción occidental del acuífero hacia la zona costera (figura 4).

Actualmente no se presentan conos de abatimiento ni alteraciones importantes en la dirección del flujo subterráneo.

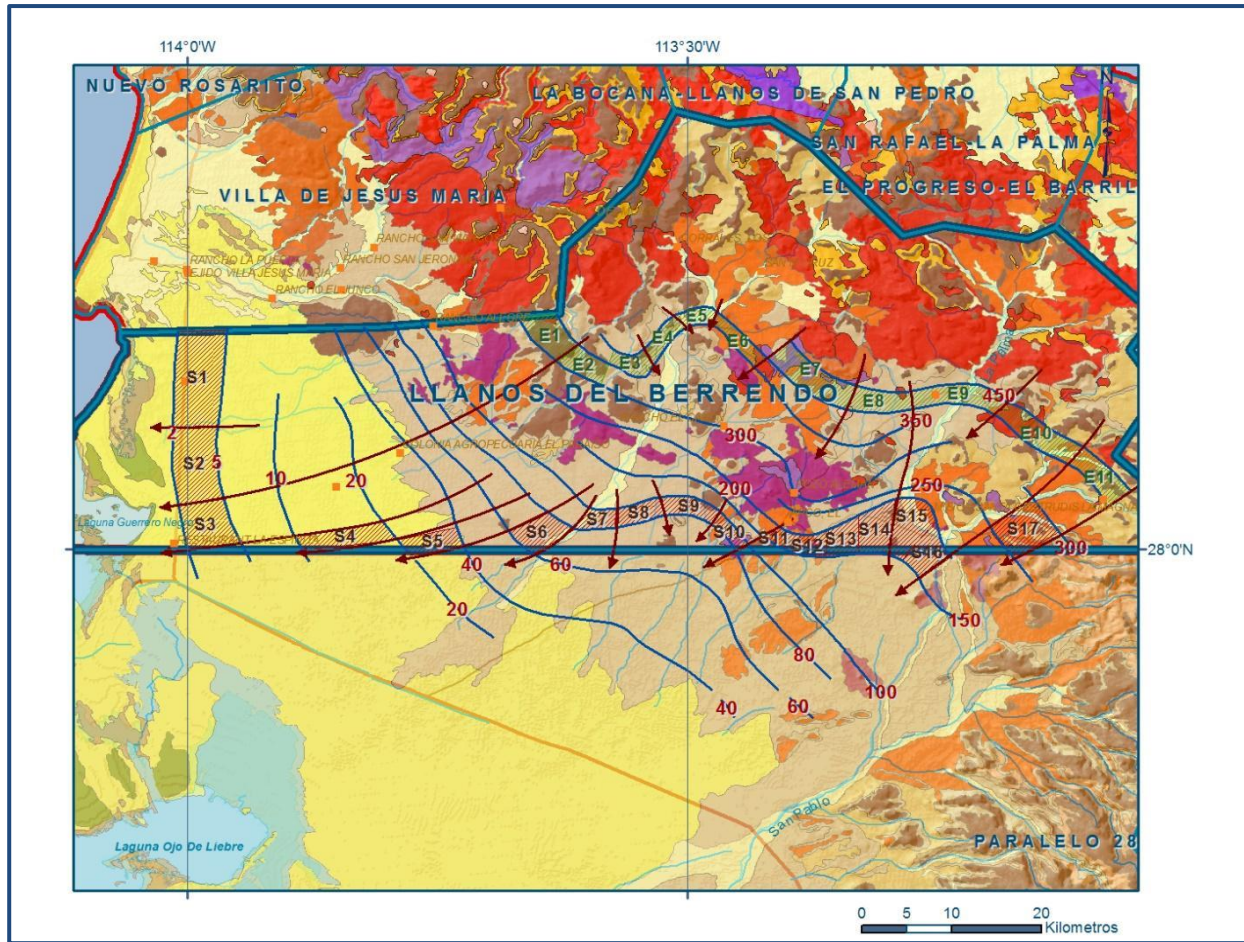


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.3.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. 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. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo realizados en el estudio de 2010, fueron recolectadas y analizadas un total de 15 muestras. La interpretación hidrogeoquímica se realizó con base en 10 de estas muestras. La mayoría de las muestras analizadas, presentan un predominio de sodio en lo referente a cationes y los cloruros en los aniones.

El agua presentó concentraciones de sólidos totales disueltos que varían de 500 a 1,000 mg/l, siendo notable la concentración que se presenta en el Rancho Las Playitas con un valor alto de 4,080 mg/l, seguido de uno de 2,680 mg/l en el Rancho El Solar. En el caso de 2 captaciones que son las más próximas a la línea de costa y al sureste del área, las concentraciones tanto de sodio como de cloruro son altas lo que evidencia la proximidad del agua marina.

De acuerdo al diagrama de Piper, la familia de agua predominante es clorurada-sódica. Existen aprovechamientos que de manera puntual exceden la cantidad máxima apta para consumo humano, en cuanto a dureza total, sólidos totales disueltos, cloruros, mercurio, sodio y hierro.

En general la calidad del agua es buena, solo algunas captaciones rebasan los límites establecidos para su potabilidad, sobre todo las captaciones próximas a la zona de costa.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado en el 2010 se registraron un total de 87 aprovechamientos, 40 son pozos, 29 norias, 1 manantial, 2 tiros de mina y 15 pozos exploratorios. Existen 42 aprovechamientos activos y 45 inactivos.

De los 42 aprovechamientos activos, 22 son pozos, 18 norias, 1 manantial y un tiro de mina. De estos la mayoría, 12 son para uso pecuario; 8 para doméstico/pecuario; 7 para doméstico/agrícola; 4 para uso doméstico; 4 para uso agrícola /pecuario; 1 para uso pecuario y 6 para usos múltiples. El valor de extracción estimado es de **0.5 hm³/año**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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:

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

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

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

El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de **2 140 km²**, que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea de donde se obtuvo información.

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los cauces principales (R_v) y la que proviene de las zonas topográficamente más altas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso en el acuífero Llanos del Berrendo no se presenta la recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

R_v= Recarga vertical;

Sh= Salidas por flujo horizontal subterráneo;

Eh= Entradas por flujo horizontal subterráneo;

B= Bombeo;

ΔV(S)=Cambio en el volumen almacenado;

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4. 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:

$$Q = B * i * T$$

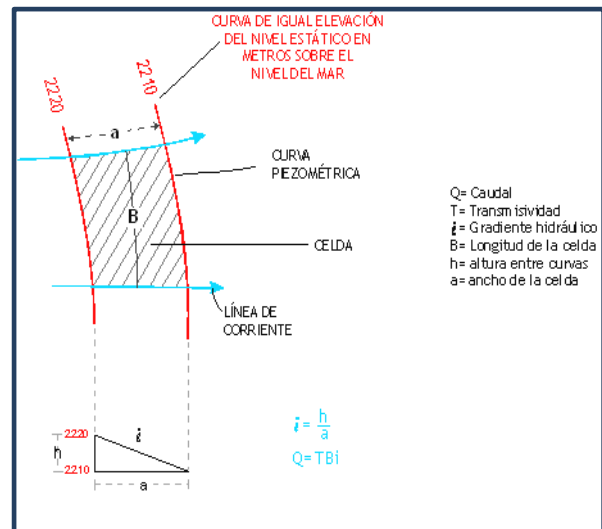
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **11.6 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo horizontal subterráneo

Canal	L(m)	B(m)	h (m)	Gradiente i	Transmisividad (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)
E1	2773	6998	50	0.01803101	0.000224	0.0	0.9
E2	2697	5776	50	0.01853912	0.00032	0.0	1.1
E3	3680	5107	50	0.01358696	0.001104	0.1	2.4
E4	3007	5156	50	0.01662787	0.00024	0.0	0.6
E5	4843	3815	50	0.01032418	0.00028	0.0	0.3
E6	2579	6145	50	0.01938736	0.00024	0.0	0.9
E7	4773	6404	100	0.02095118	0.00012	0.0	0.5
E8	4135	4962	100	0.0241838	0.00024	0.0	0.9
E9	3571	6299	100	0.02800336	0.00046	0.1	2.5
E10	3976	8798	100	0.02515091	0.000096	0.0	0.7
E11	4234	11319	100	0.02361833	0.000096	0.0	0.8
TOTAL							11.6

7.2 Salidas

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo de aprovechamientos e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **0.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático de 2010 (Figura 4). Las celdas de salida se localizan hacia la parte más baja del área de explotación. El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 3. El valor de las salidas subterráneas es igual a **20.6 hm³/año**.

Tabla 3. Salidas subterráneas por flujo horizontal

Canal	L(m)	B(m)	h (m)	Gradiente i	Transmisividad (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)
S1	4609	10325	3	0.000651	0.003922016	0.03	0.8
S2	4496	8148	3	0.000667	0.003922016	0.02	0.7
S3	5232	5185	3	0.000573	0.003922016	0.01	0.4
S4	8441	3396	10	0.001185	0.006938951	0.03	0.9
S5	6048	4752	20	0.003307	0.008749112	0.14	4.2
S6	4276	3942	20	0.004677	0.001008	0.02	0.6
S7	2848	4437	20	0.007022	0.001008	0.03	1.0
S8	2271	4975	20	0.008807	0.001005411	0.04	1.4
S9	2201	4787	20	0.009087	0.000264071	0.01	0.4
S10	2149	4298	20	0.009307	0.000144039	0.01	0.2
S11	2333	2487	50	0.021432	0.000144039	0.01	0.2
S12	2548	3211	50	0.019623	0.000264071	0.02	0.5
S13	3746	2786	50	0.013348	0.000797395	0.03	0.9
S14	4758	3839	50	0.010509	0.001664129	0.07	2.1
S15	6640	3501	50	0.007530	0.001664129	0.04	1.4
S16	4272	3665	50	0.011704	0.001664129	0.07	2.3
S17	5375	5292	50	0.009302	0.001664129	0.08	2.6
TOTAL							20.6

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica histórica suficiente para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático en un periodo de tiempo. La escasa información disponible se restringe a pequeñas áreas y sólo muestra variaciones puntuales tanto positivas como negativas. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. De acuerdo con 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 que para fines del balance $\Delta V(S) = 0$.

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical (R_v). De la ecuación correspondiente, se tiene que:

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 0.5 + 20.6 - 0.0 - 11.6$$

$$R_v = 9.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de las entradas.

$$R = R_v + Eh$$

$$R = 9.5 + 11.6$$

$$R = 21.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

En su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

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 **21.1 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 caso se considera que la descarga natural comprometida corresponde a las salidas subterráneas (Sh) hacia el mar y hacia el acuífero Vizcaino.

De las salidas hacia el mar, se considera comprometido el volumen estimado a partir de la configuración de elevación del nivel estático que es de 0.7 hm³/año, evaluado considerando el flujo de agua que sale hacia el mar por las celdas 1, 2, 3, 4 y 5 consideradas en la red de flujo.

Adicionalmente se considera comprometido el 25% del volumen calculado que sale hacia el acuífero Vizcaíno y que es de 3.4 hm³/año. Por lo tanto la **DNC = 10.4 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 **993,233 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 21.1 - 10.4 - 0.993233 \\ \text{DMA} &= 9.706767 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **9,706,767 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. 1973. Geología, Geofísica y Geoquímica del Valle del Rosario en el estado de Baja California, elaborado por la empresa GEOFIMEX, S. A.