



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL DESCANSO (0203), ESTADO DE
BAJA CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica	5
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural	13
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1 Tipo de acuífero.....	15
5.2 Parámetros hidráulicos	15
5.3 Piezometría.....	15
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático	17
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	19
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	20
7.2 Salidas	22
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	22
7.2.2 Bombeo (B)	24
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	25
8. DISPONIBILIDAD	26
8.1 Recarga total media anual (R).....	26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	27
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	27
9. BIBLIOGRAFÍA	28

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 El Descanso, definido con la clave 0203 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroeste del estado de Baja California, tiene una superficie aproximada de 267 km². Colinda al norte con los acuíferos Los Médanos y Las Palmas, al sur con el acuífero La Misión y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 1).

Geopolíticamente se encuentra ubicado en los municipios Tecate y Playas de Rosarito.

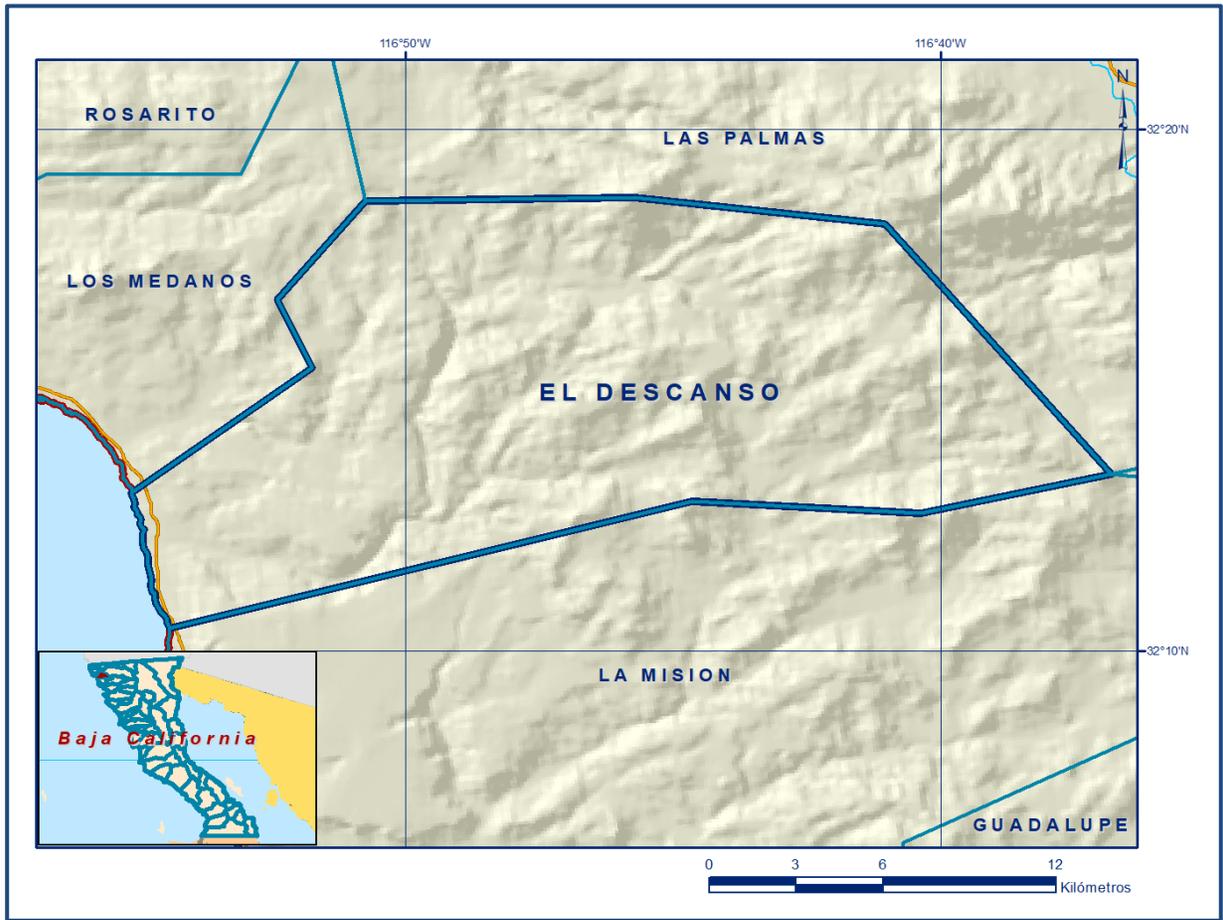


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0203 EL DESCANSO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	50	45.3	32	18	38.9	
2	116	45	43.7	32	18	41.9	
3	116	41	2.1	32	18	11.9	
4	116	36	48.2	32	13	24.3	
5	116	40	22.1	32	12	38.9	
6	116	44	39.1	32	12	52.2	
7	116	54	24.8	32	10	26.6	DEL 7 AL 8 POR LA LINEA DE BAJA MAR A LO LARGO DE LA COSTA
8	116	55	7.7	32	13	2.4	
9	116	51	44.6	32	15	26.2	
10	116	52	24.0	32	16	44.6	
1	116	50	45.3	32	18	38.9	

12 Situación administrativa del acuífero

El acuífero El Descanso pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965. Este decreto se clasifica como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Baja California instalado el 7 de diciembre de 1999. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

ANÁLISIS GEOQUÍMICO. Elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Distrito de Riego No.14, Río Colorado B.C., Departamento de Desarrollo, en 1979. Los resultados indican que el contenido de Sólidos Totales Disueltos varía de 518 a 2761 ppm, en tanto que los valores de pH variaba de 6.9 a 7.9. De acuerdo a la clasificación del agua para uso agrícola, tomando en cuenta el criterio de Wilcox que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasificó como C_3-S_1 , que representa agua de salinidad alta (C_3) y contenido bajo de sodio (S_1).

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES EL MÉDANO Y EL DESCANSO, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE.

Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. en 1979. En este estudio se identificaron 3 unidades geohidrológicas que se agruparon en baja, media y alta permeabilidad. Se tomaron 13 muestras de agua en El Descanso para análisis geoquímico, determinándose que el agua por el contenido de sales disueltas es del tipo mixto-clorurada.

Los valores obtenidos de sólidos totales disueltos son menores a las 1 000 ppm y sólo en una obra es mayor a las 1 500 ppm. Para ese año la profundidad del nivel estático variaba de 1.1 a 5.8 m, predominando los valores de 3 a 5 m, con valores de elevación

del nivel estático de 2.5 a 8.9 msnm, registrándose las menores elevaciones hacia la parte central y occidental y las mayores hacia la porción oriental.

El estudio concluye que el potencial del valle El Descanso era de 1.9 hm³ anuales y que la calidad química del agua es en general apta para todo uso.

Estudio para Actualizar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales Superficiales en las 85 (ochenta y cinco) Sub-regiones Hidrológicas de las 7 (siete) Regiones Hidrológicas de la Península de Baja California, Mediante la Aplicación de la NOM-011-CNA-2000. Elaborado por la Universidad Autónoma de Baja California en 2005. Mediante este estudio fue posible obtener el escurrimiento de las cuencas para determinar su disponibilidad media anual de agua superficial.

ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 20 ACUÍFEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. en 2008. El objetivo principal de este estudio fue plantear el balance preliminar de aguas subterráneas para determinar la disponibilidad, mediante la realización actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La región de estudio pertenece a la provincia fisiográfica de Baja California (Raisz, 1964), subprovincia Sierra de Juárez.

Esta última se considera la continuación meridional del Complejo Cristalino de la Sierra Nevada que aflora en California (USA) y se caracteriza por ser una gran masa de rocas graníticas limitada al este por un corte repentino (constituyendo probablemente un escarpe de falla) hacia la depresión Saltón (E. López Ramos, 1979). En términos generales la Sierra de Juárez puede describirse como una gran faja elevada, inclinada hacia el oeste, dividida en una serie de cadenas montañosas paralelas que incluyen a las sierras San Jacinto y Santa Rosa en California (USA), y las sierras Juárez y San Pedro Mártir en Baja California.

La provincia fisiográfica de Baja California está limitada al norte por las Sierras Transversales de la Alta California (Bailey y Johns, 1954); hacia el este por las depresiones Saltón, San Felipe-Tiburón y Hermosillo-Guaymas, que yacen en el Golfo de California; hacia el noroeste por la provincia fisiográfica Continental Borderland (Emery, 1941); al oeste por los restos de las rocas metamórficas de las islas Cedros, San Andrés, Magdalena y Santa Margarita (en el Océano Pacífico); y hacia el suroeste con la provincia fisiográfica de Sierras en la Plataforma Marina de Baja California (Sea Mount Province) (E. López Ramos, 1979).

En la porción septentrional de la Sierra de Juárez, entre su elevación promedio de 1660 msnm y la costa del Océano Pacífico –variando ésta última en el rango de 30 a 700 m debido a la presencia de acantilados-, la topografía accidentada presenta mesetas cuya altitud desciende al occidente, entre las cuales se forman algunos valles de reducida extensión, cuya altitud fluctúa entre los 2100 y 300 msnm. Entre éstos, podemos mencionar los valles de Las Palmas, San Rafael, Ojos Negros, Real del Castillo, Álamo, Santa Trinidad y La Encantada; todos ellos drenados por arroyos que generalmente transcurren por profundos y estrechos cañones.

En la cuenca a la que pertenece el acuífero El Descanso la zona montañosa presenta los rasgos morfológicos de la Sierra de Juárez, modelada en un sistema de grandes bloques afallados producidos, primero por la intrusión del batolito peninsular durante el Cretácico Medio (F. Mina, 1957) y posteriormente por el periodo de grandes fallamientos del Pleistoceno (C. Beal, 1948). La franja costera presenta una terraza marina del Cretácico y Paleógeno-Neógeno que emergió durante el Cuaternario.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones particulares de la República Mexicana, el Valle El Descanso presenta clima seco o estepario, templado con verano cálido y régimen de lluvias invernal.

Las principales características climatológicas de la región se determinaron mediante los registros de las siguientes estaciones: Boquilla de Santa Rosa, Colonia Guadalupe, La Misión, Olivares Mexicanos, Presa A. Rodríguez Rancho Bellavista y Valle de las Palmas.

De acuerdo a la estación climatológica Tijuana, la temperatura media anual es de 16.4° C. La temperatura media de los meses más cálidos, de julio a agosto, es de 23.9° C. La temperatura media del mes más frío se presenta en enero con 7.2°C. Las variaciones extremas de temperatura son 38.9° C y - 2.2° C.

Con respecto a la precipitación, su valor promedio anual es de 262 mm, el mes de mayor precipitación es enero con una precipitación promedio de 55.4 mm y el mes de menor precipitación es julio con 0.25 mm. La precipitación tiene comportamiento estacional, entre los meses de noviembre a abril ocurre el 87% del volumen total.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No.1 Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, cuenca del Río Tijuana-Arroyo Maneadero. El área perteneciente al acuífero El Descanso se encuentra integrada por arroyos de tipo intermitente que tienen su origen en las distintas montañas que rodean al Valle como son: El Cerro Gordo, Cerro La Bola y Cerro La Mentada.

La red de drenaje forma tributarios de primer y segundo orden principalmente, que se integran formando el cauce principal en el Cañón El Descanso, el cual en su extremo forma un estero que desemboca en el Océano Pacífico.

El drenaje es de tipo subparalelo y presenta un control de tipo geológico estructural fuerte. La dirección que presenta el arroyo principal es en sentido este-oeste.

3.4 Geomorfología

El acuífero El Descanso se encuentra en una zona que se caracteriza por presentar un relieve abrupto integrado por cerros y cañones así como una mesa denominada Mesa El Descanso, localizada en la parte sur del acuífero con un área de 7.2 km² aproximadamente, presenta un control estructural bien definido que se visualiza en la porción noreste.

Las elevaciones más fuertes se encuentran delimitando el parteaguas del acuífero, definidos por las cimas de los cerros La Bola y Cerro Gordo, cuyas elevaciones superan los 1 280 y 1 100 msnm, respectivamente.

El rasgo morfológico más relevante es La Mesa El Descanso que se expresa como una planicie que se eleva a 300 msnm, la cual presenta una forma rectangular alargada con dirección este-oeste que forma pequeños cañones en sus bordes norte y sur, como consecuencia de la actividad volcánica basáltica que tuvo lugar en el Cenozoico. Estas rocas están en contacto con domos de composición andesítica y riolítica más antiguos, posiblemente de edad Mesozoica que forman el cuerpo de los cerros La Bola y Gordo.

La franja costera presenta un aspecto rugoso, con lomeríos y mesas constituidos por sedimentos marinos en su base y frecuentemente coronados por tobas y flujos de lavas basálticas. Otro rasgo característico es la existencia de terrazas marinas bien desarrolladas. Las playas generalmente son muy angostas, excepto en las desembocaduras de los arroyos en donde se ensanchan y forman con frecuencia pequeños deltas. La topografía dentro del arroyo y las áreas adyacentes está sumamente accidentada con una serie de barrancos que están alineados sobre un eje Noreste-Suroeste y que desembocan hacia la costa. Los barrancos son valles montañosos, profundos y estrechos, equivalentes a cañones o valles en forma de V, con grandes pendientes verticales.

4. GEOLOGÍA

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 Norte 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 Paleógeno-Neógeno que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables (figura 2).

Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario; su distribución de oeste a este es como sigue:

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.

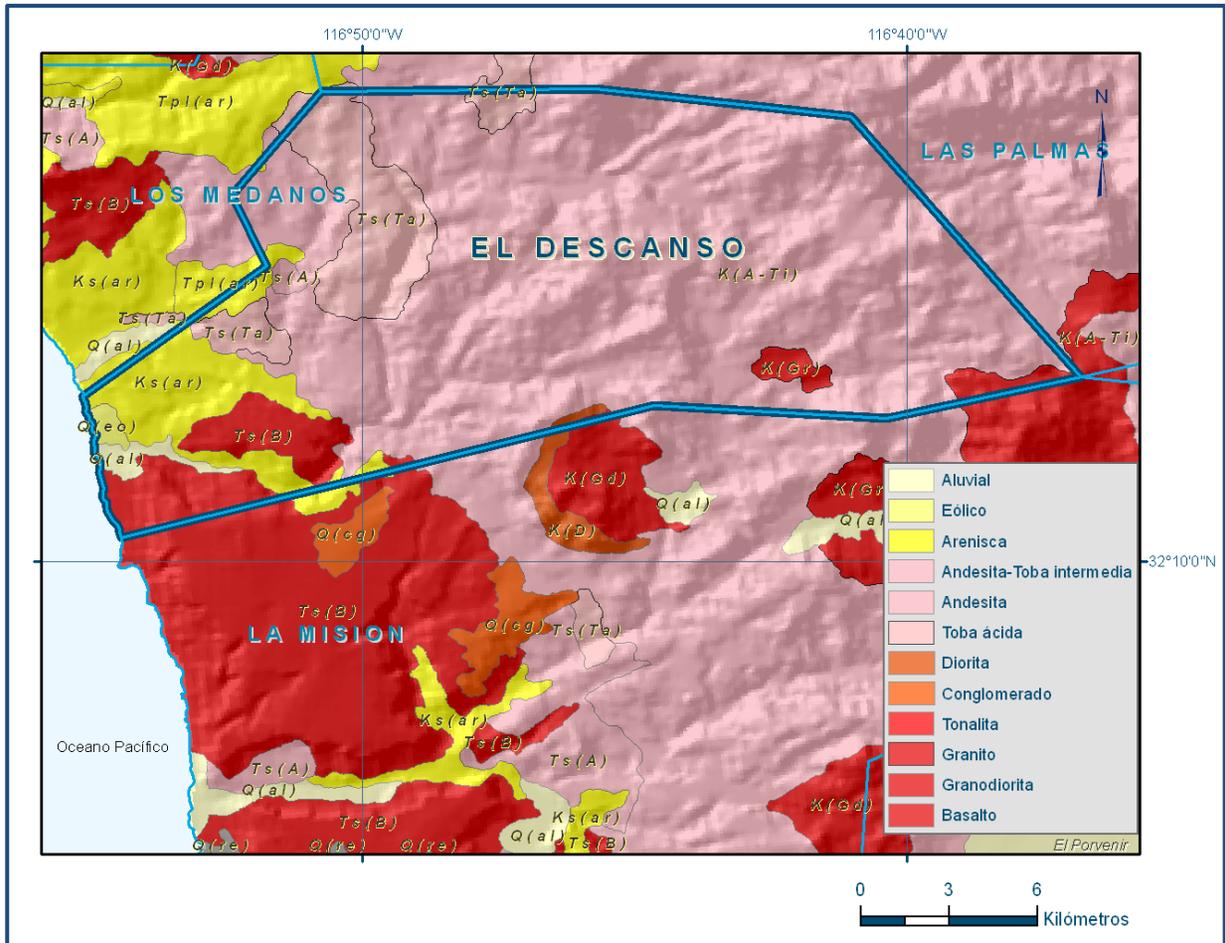


Figura 2. Geología general del acuífero

Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados, que contienen tanto fauna marina como huesos de saurios, lo que refleja el desarrollo de ambientes que variaron desde continentales hasta de plataforma y talud con líneas de costa fluctuantes, semiparalelas a la línea que divide a este cinturón de los terrenos ubicados al oriente, los cuales constituyeron la fuente de suministro de sedimentos clásticos. Gastil *et al.* (1975) denominan a este límite “Línea Santillán-Barrera” y consideran que este rasgo ha controlado la depositación por largos periodos. El siguiente cinturón está conformado por secuencias de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias cuya edad asignada corresponde al Cretácico Inferior. La secuencia superior y de mayor distribución fue definida originalmente por Santillán y Barrera (1930), en INEGI (1984), como Formación Alisitos, en la localidad tipo Rancho Alisitos ubicada al sur de Ensenada.

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.

En el delta del río que se forma en la salida del Cañón El Descanso, se depositó una unidad de areniscas de edad Cretácico Superior, sobre la cual descansan los derrames basálticos de la Mesa El Descanso.

Sobre la línea de costa existen sedimentos recientes originados por los procesos erosivos que afectaron a las rocas circundantes y gracias a la acción eólica fueron transportados y depositados.

4.1 Estratigrafía

En el acuífero El Descanso aflora una variedad de rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo rango estratigráfico varía del Cretácico Inferior al Plioceno-Pleistoceno. En la parte este del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas como parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior.

Sobre estas rocas sobreyace a una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas que abarcan gran parte de la zona; las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas y se les asigna una edad Neógeno y Plio-Pleistoceno.

Cretácico Inferior

Formación Alisitos. Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), 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 en el este-noreste de El Rosario, Baja California y se considera como la sección más completa (López, 1980). Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica.

Esta formación se encuentra deformada y parcialmente metamorfoseada, está afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de numerosos cuerpos graníticos del Cretácico. Se encuentra subyaciendo en forma discordante a la Formación Rosario y sus afloramientos se extienden por más de 240 km a lo largo de la porción occidental del norte de la Península de Baja California, desde Punta China hasta casi llegar a Rosarito.

Existen numerosos afloramientos de esta secuencia en la margen occidental de las actuales sierras cristalinas que son correlacionables en litología y contenido faunístico. 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. La Formación Alisitos estuvo sujeta a un periodo de compresión, a principios del Cretácico Tardío, que plegó la secuencia y la metamorfoseó parcialmente. Durante este periodo la secuencia emergió y al occidente se inició la sedimentación de lo que sería la Formación Rosario.

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 metamorfoseada 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. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Rocas ígneas Intrusivas (Kigi)

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.

Cretácico Superior

Formación Rosario (Kr): formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación 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 Paleógeno-Neógeno 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 (lower sandstone member, LSS), (b) miembro lodolítico medio (middle mudstone member, MM) y (c) miembro conglomerático-arenoso superior (upper sandstone-conglomerate member, USS).

Los tres miembros 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.

Esta formación cubre -en discordancia angular- a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas, y subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas de estos autores ubican estratigráficamente a la Formación Rosario en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Se ha calculado un espesor máximo de 750 m.

Formación Rosarito Beach (Mi). Esta formación ha sido subdividida por Ashby (1989) en diez miembros distintos, cinco de los cuales se encuentran en la Subcuenca de Tijuana y los otros cinco en la Subcuenca La Misión.

Los afloramientos actuales de rocas de la Cuenca Rosarito Beach se encuentran limitados al este por los terrenos batolíticos y prebatolíticos de las serranías peninsulares y hacia el oeste por la actual línea de costa. La margen occidental puede extenderse para incluir a las Islas Los Coronados, cerca de Tijuana y a las Islas Todos Santos cercanas a Ensenada. El límite norte se extiende hacia la porción sur del Condado de San Diego, California, en donde se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos plio-pleistocénicos marinos y gravas fluviales. Los afloramientos meridionales se presentan en Punta San Miguel y al suroeste en las Islas Todos Santos.

De manera general, está constituida por intercalaciones de basaltos, tobas y brechas que afloran en las subcuencas de Rosarito y Tijuana. De la base a la cima, los cinco miembros de la subcuenca Tijuana corresponden a depósitos sedimentarios y volcánicos.

Base: predominan sedimentos de plataforma con intercalaciones delgadas de derrames basálticos con horizontes de toba.

Cima: compuesto principalmente por derrames de lava con intercalaciones de arenisca, toba y limonita.

Hiato: persistió hasta el Plioceno, dando lugar a depósitos aislados de cuenca, los cuales forman dos unidades pertenecientes a la Formación San Diego, constituida por dos miembros: Miembro Inferior formado por areniscas de grano fino a medio, con lentes de conglomerado, de coloración amarillenta; el Miembro Superior está constituido por areniscas de grano medio, con intercalaciones de conglomerado que hacia la son más frecuentes y de constitución más gruesa.

Sedimentos recientes. Hacia la parte baja de la cuenca, afloran sedimentos aluviales en el cauce del río El Descanso, así como sedimentos eólicos que se han acumulado en el litoral.

4.2 Geología estructural

En el acuífero se observan patrones estructurales bien definidos, los cuales se definieron mediante fotointerpretación y presentan 2 direcciones principales de lineamiento.

Hacia el noreste, en los Cerros Los Nopales, Microondas, La Bola y Cerro Gordo, se observa una tendencia NW-SE probablemente relacionada a la dinámica regional y a la deformación que existe en la zona de relevo entre la falla San Miguel y la Falla Vallecitos, ambas de tipo lateral derecha.

En esta zona en particular se observa abundante cizallamiento relacionado a las estructuras regionales. En general las rocas de la región se encuentran fracturadas con una dirección principal NW-SE, aunque en la región costera se observan lineamientos casi en sentido E-W, los cuales aparecen como estructuras secundarias al fallamiento regional principal.

4.3 Geología del subsuelo

Dentro del área se tiene registro de un perfil que se llevó a cabo por el método eléctrico resistivo en el año 1979 por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería S.A., el perfil correspondiente al valle tiene una orientación NW-SE, con una longitud de 2 km aproximadamente. Se compone de 3 sondeos los cuales tienen una separación de 1 km entre 2 sondeos consecutivos. Obteniéndose los siguientes resultados: En los 3 sondeos eléctricos que tuvieron una profundidad teórica de 500 m, se identificaron tres unidades geohidrológicas. Las resistividades entre 7 y 13 Ω -m se registran desde el nivel del terreno hasta más de 200 m y corresponden a arcillas marinas de la Formación el Rosario. Existe un estrato con valores de resistividad que varían de 27 a 37 Ω -m, asociado a sedimentos arcillo-arenosos que se localizan de los 100 a 150 m de profundidad. Esta unidad es la más favorable para la exploración y explotación de agua subterránea y constituye el acuífero que se explota actualmente.

Unidad impermeable: en esta unidad quedan agrupadas las limolitas, areniscas y conglomerados. Las areniscas son de grano fino, de color café rojizo, con intercalaciones de gravas sueltas, que funcionan como barreras laterales. También pertenecen a esta unidad las rocas ígneas extrusivas (riolitas, tobas riolíticas) y metamórficas (esquistos).

Unidad semipermeable: está constituida por materiales de tipo granular muy compactos a semicompactos, formados por fragmentos de rocas ígneas y sedimentarias preexistentes. Otras rocas que constituyen esta unidad son los basaltos los cuales presentan una coloración grisácea, que intemperizan en color rojizo, con alto grado de fracturamiento.

Unidad permeable: Está constituida por materiales granulares poco compactos de granulometría variada, predominantemente media a fina y saturados, derivados de las sierras circundantes y depositados en los lechos de los arroyos por las corrientes fluviales.

Existen además depósitos de aluvión de composición granulométrica más gruesa. En general el suelo del valle es de tipo arcillo-arenoso constituyendo un buen acuífero, cuyo espesor puede alcanzar los 200 m. Dentro de esta unidad están localizadas la mayoría de los aprovechamientos.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las unidades de roca que presentan mayor potencial de almacenamiento son aquellas de tipo sedimentario compuestas por material granular como las arenas y areniscas localizadas hacia la zona costera, donde también se observan depósitos eólicos. Las rocas ígneas presentan alta permeabilidad y potencial de almacenamiento debido al fuerte fracturamiento y fallamiento por el que fueron afectadas, formando además la zona que recarga al acuífero. De acuerdo con la geología del subsuelo y la estratigrafía del área se deduce que se trata de un acuífero libre, conformado por sedimentos aluviales y areniscas. Los basaltos, tobas y andesitas constituyen en superficie zonas de recarga, pero a profundidad pueden alojar acuíferos potenciales.

5.2 Parámetros hidráulicos

No se han realizado pruebas de bombeo en los aprovechamientos de la región. Sin embargo, de acuerdo con estimaciones hidrogeológicas hechas en 1979, los valores de transmisibilidad varían de **1.1×10^{-3} a $6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , valores que son consistentes con los valores promedio obtenidos en los acuíferos vecinos Rosarito y La Misión.

5.3 Piezometría

No existe información piezométrica histórica. Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con información correspondiente al año 2008.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración realizada para el año 2008 se observa que la profundidad al nivel estático varía entre algunos centímetros, registrados en la zona costera, hasta los 18 m conforme se asciende topográficamente (figura 3). En la parte media del acuífero, donde se concentra la extracción, se presentan valores mayores de profundidad.

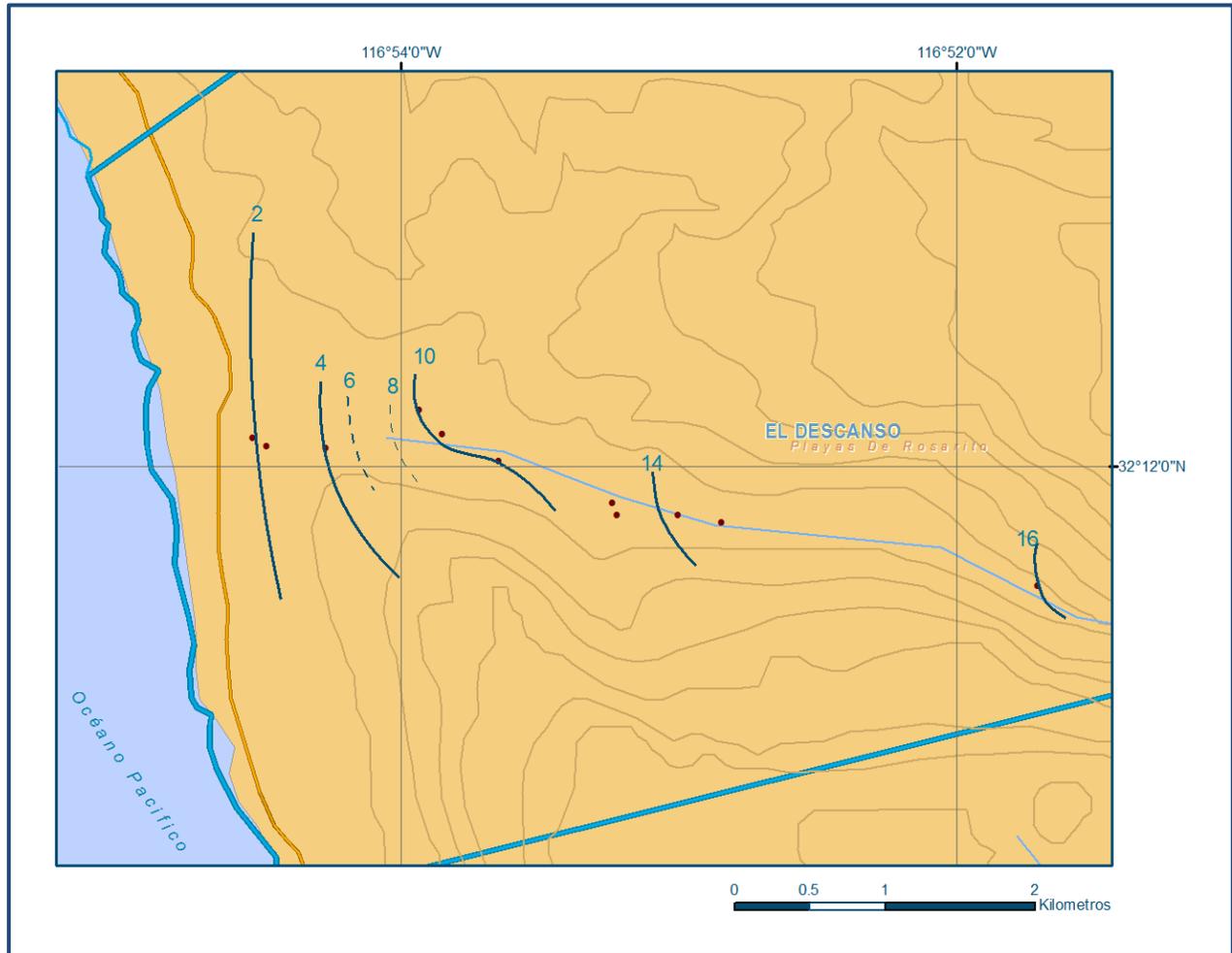


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 4), se observa que sus valores, al igual que la profundidad, muestran claramente el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo en condiciones naturales no ha sufrido alteraciones importantes causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Los valores de elevación varían de 1 a 40 msnm.

De esta manera, se establece que el flujo subterráneo muestra una dirección preferencial de este a oeste, paralela al escurrimiento superficial.

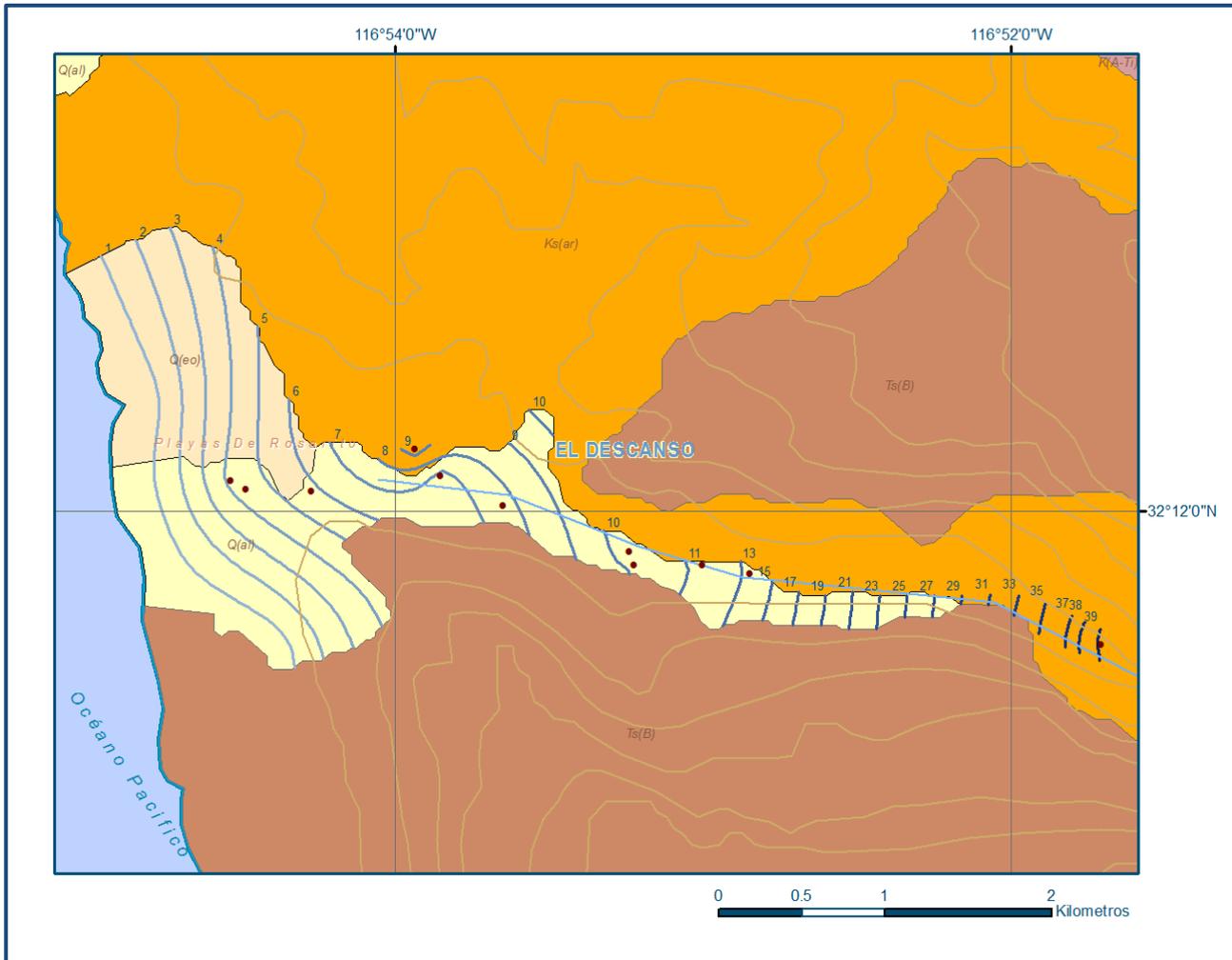


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita elaborar una configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, el volumen de extracción es inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo con la información de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua, que se realizaron como parte de los trabajos del estudio realizado en 1979, se determina que las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 518 a 2761, registrándose los valores más altos hacia la zona costera, reflejando de esta manera la trayectoria preferencial del flujo subterránea este-oeste. El catión más abundante es el sodio que representa concentraciones de 57 a 442 ppm, en tanto que el cloruro es el anión más común, con variaciones en su concentración de 135 a 991 ppm. En cuanto a las familias del agua, predomina el tipo mixta-clorurada.

Las determinaciones realizadas en 2008 muestran que los valores de conductividad eléctrica varían de 0.66 a 5.58 $\mu\text{S}/\text{cm}$, registrándose los valores más altos hacia el estero.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

No fue posible realizar una estimación de los volúmenes de extracción por bombeo; por lo que se considera el valor del volumen registrado e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). De acuerdo con esto, existen 127 aprovechamientos que en conjunto extraen un volumen anual de **1.9 hm³**. De ellos, 1.4 hm³ (73.7 %) se destinan a las actividades agrícolas, 0.4 hm³ (21.0 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero y los 0.1 hm³ (5.3 %) anuales restantes para uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó únicamente para el año 2008, en una superficie de 4.2 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (R_v) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, el riego agrícola es incipiente y utiliza sistema tecnificado, no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (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:

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

Donde:

- R_v :** Recarga Vertical
- E_h :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B :** Bombeo
- S_h :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR :** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy (tabla 2), partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

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

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

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

Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

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

Donde:

T = Transmisividad en m^2/s

B= Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m

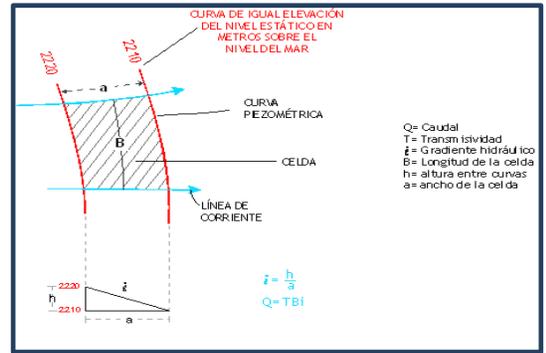


Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008

Celda	T ($10^{-3} m^2/s$)	B (m)	i	Q (m^3/s)	Vol anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E ₁	5.266	165	0.01351	0.0117	0.37
E ₂	5.266	168	0.00469	0.0041	0.13

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 es de **0.5 hm^3** .

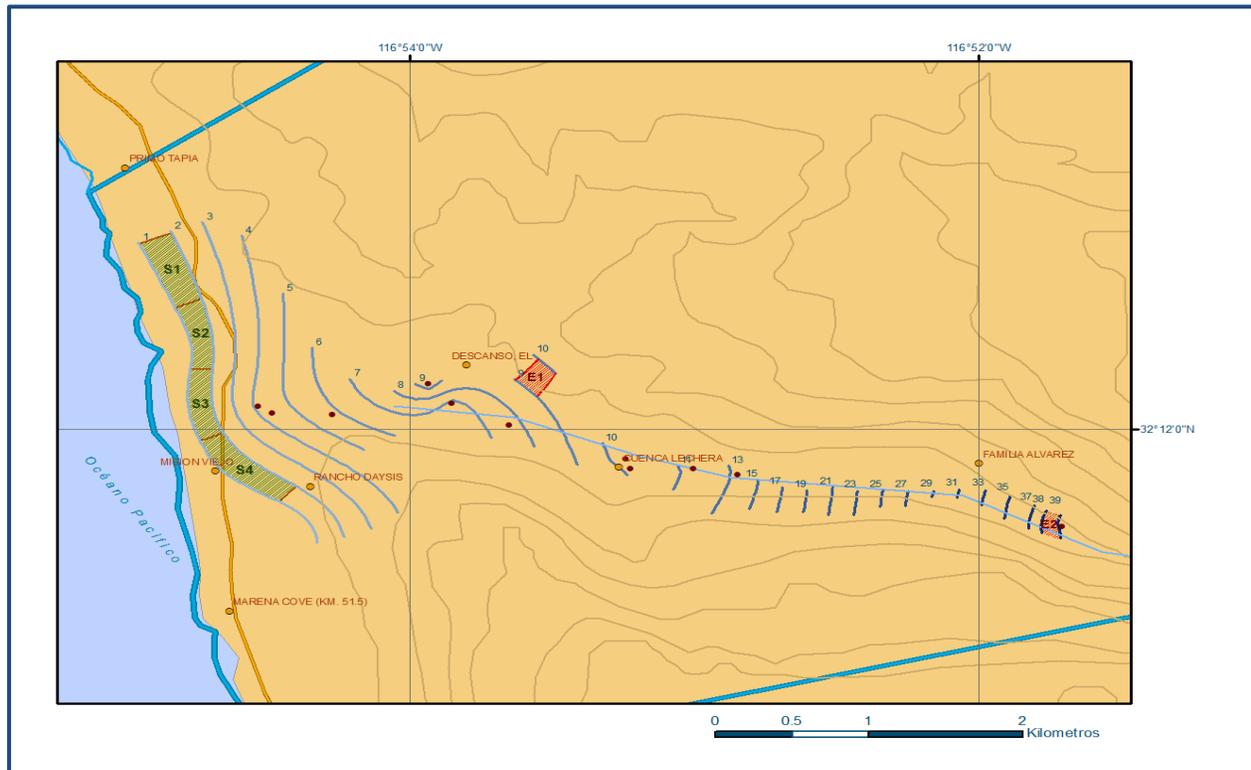


Figura 5. Red y celdas de flujo subterráneo

7.2 Salidas

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

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real).

El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) son parámetros utilizados para estimar la recarga potencial por infiltración.

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2 (mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.4		
P(mm) =	262	P ² =	68644
L =	930.5472	L ² =	865918.091
ETR (mm)	264.8		

Sin embargo, debido a que el valor de la precipitación media anual es muy bajo (262 mm), no se pueden aplicar los métodos empíricos para la estimación de ETR, como el método de Turc o el de Smith, ya que en ambos métodos para considerar confiable la estimación del volumen de evapotranspiración, deben presentarse precipitaciones mayores a 320 y 300 mm, respectivamente, dependiendo del valor de la temperatura promedio anual.

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. Entonces debido a que la precipitación resultó menor que la relación 0.31L, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor valor de la precipitación.

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal.

Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973) figura 6.

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al nivel estático menor a 3 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (**1 470 mm** CONAGUA Organismo de Cuenca Baja California).

El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático.

Con estos valores se obtuvo una lámina evaporada para el año de análisis de acuerdo a la profundidad media al nivel estático (100, 200 y 300 cm), multiplicando finalmente por el área susceptible a la evaporación se obtuvo un volumen anual evaporado, para el año 2008 de **0.1 hm³**. En la tabla 3 se muestran los porcentajes respecto al volumen evaporado para las profundidades de 100, 200 y 300 cm.

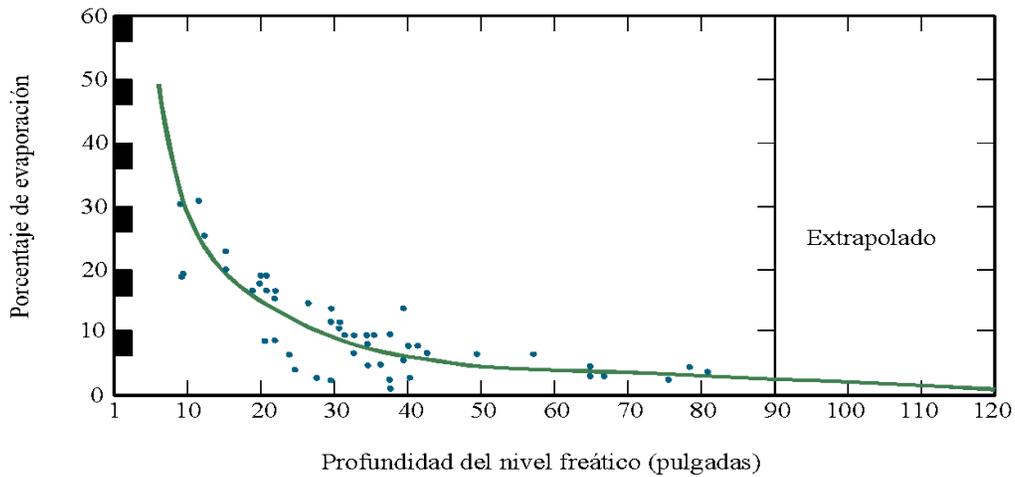


Figura 6. Evaporación de agua freática en función de la profundidad al nivel estático

Tabla 3. Volumen de evapotranspiración

Profundidad media al nivel estático (cm)	% de evaporación (estimado gráfica de White)	Lámina Evaporada en el acuífero (mm/año)	Lámina Evaporada en el acuífero de acuerdo a la profundidad (mm/día)	Área (Km ²)	Volumen de evapotranspiración (hm ³ /año)	Total volumen Evapotranspirado (hm ³ /año)
2008						
100	6.25	1,470	0.25	0.9	0.09	
200	3.75	1,470	0.15	0.6	0.03	
300	0.92	1,470	0.04	0.5	0.01	
						0.13

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **1.9 hm³/año**.

7.2.3 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 NE presentada en la figura 5. El valor estimado es de **0.7 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 4.

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

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i	Q (m^3/s)	Vol anual (hm^3)
SALIDAS LATERALES					
S ₁	0.694	555	0.0056	0.0022	0.07
S ₂	1.389	545	0.00707	0.0054	0.17
S ₃	1.389	550	0.00743	0.0057	0.18
S ₄	2.083	640	0.00654	0.0087	0.28

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 para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 0.7 + 1.9 + 0.1 - 0.0 - 0.5$$

$$R_v = 2.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 2.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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 **2.7 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, se considera comprometido el 60 % de las salidas subterráneas, que equivale a **0.4 hm³ anuales**. La descarga por evaporación no se considera comprometida porque en la zona costera más próxima a la costa el agua es de mala calidad. **DNC = 0.4 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 (REPGA), 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 **1,799,089 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 2.7 - 0.4 - 1.799089 \\ \text{DMA} &= 0.500911 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **500,911 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría De Agricultura Y Recursos Hidráulicos. 1979. Estudio Geohidrológico de los Valles “El Médano y El Descanso”, en el estado de Baja California Norte. Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A.