



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN RAFAEL (0217), 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.....	7
3.1 Provincia fisiográfica	7
3.2 Clima	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	10
4.2 Geología estructural	12
4.3 Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos	15
5.3 Piezometría.....	15
5.4 Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	15
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.....	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	19
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	20
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	20
7.2 Salidas	21
7.2.1 Bombeo (B).....	22
7.2.2 Cambio de almacenamiento (Δ VS)	22
8. DISPONIBILIDAD	22
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	23
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	24
9. BIBLIOGRAFÍA	25

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.

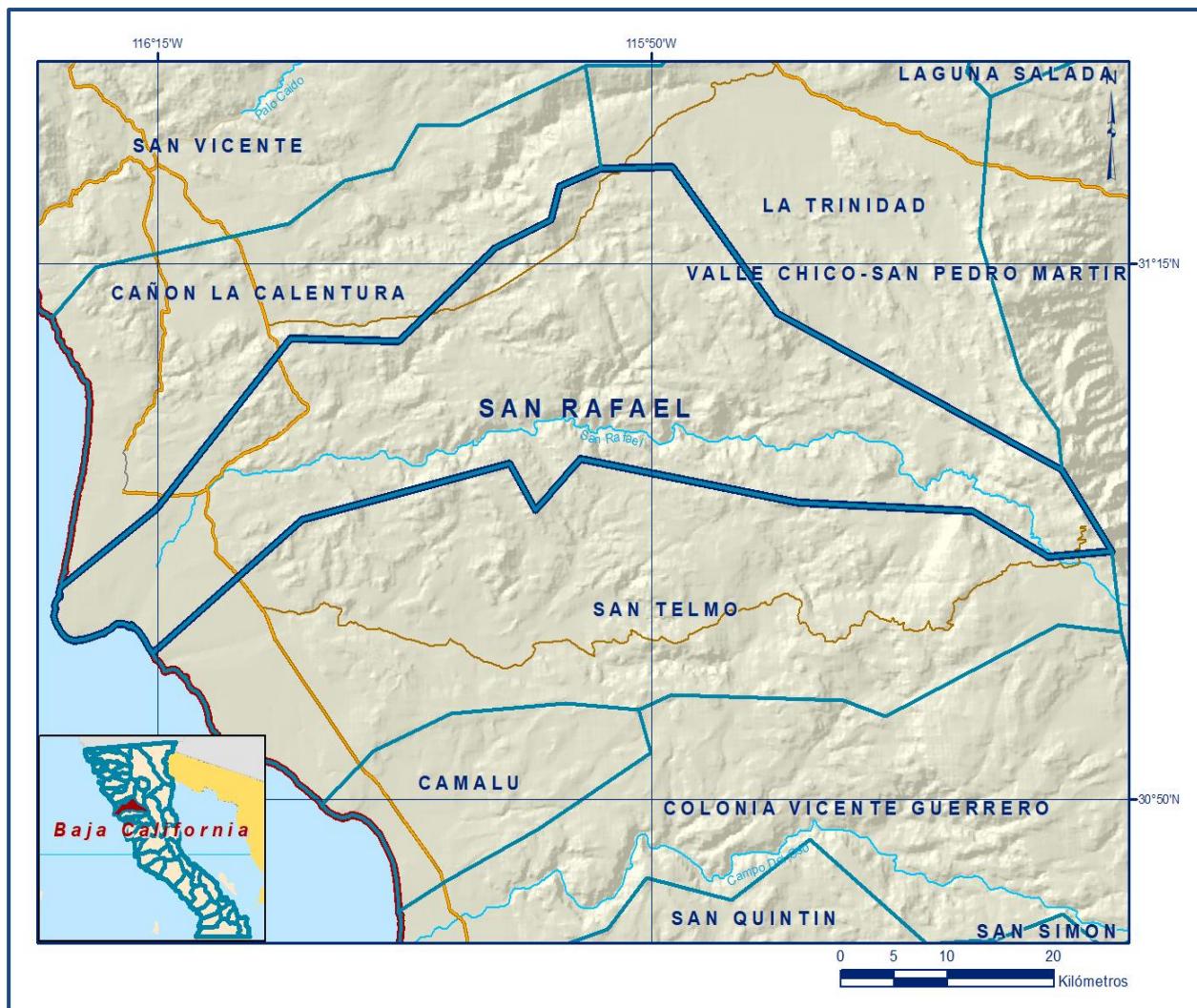
Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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 San Rafael, definido con la clave 0217 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción noroccidental del estado de Baja California, cubriendo una superficie aproximada de 1,261 km². Se encuentra delimitado por los paralelos 31° 08' y 31° 19' de latitud norte y los meridianos 115° 26' y 116° 20' de longitud oeste (figura 1).

Limita al norte con los acuíferos Cañón La Calentura y La Trinidad, al oriente con el acuífero Valle Chico-San Pedro Martir, al sur con el acuífero San Telmo y al poniente con el Océano Pacífico. Geopolíticamente se encuentra en el municipio de Ensenada.



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 0217 SAN RAFAEL							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	48	57.6	31	19	311	
2	115	43	38.3	31	12	417	
3	115	29	15.8	31	5	24.0	
4	115	26	43.0	31	1	36.3	
5	115	29	57.6	31	1	210	
6	115	33	45.6	31	3	29.0	
7	115	42	33.0	31	3	50.4	
8	115	53	36.7	31	5	55.3	
9	115	55	53.0	31	3	318	
10	115	57	12.5	31	5	42.2	
11	116	7	415	31	3	3.8	
12	116	15	16.1	30	56	49.9	DEL 12 AL 13 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
13	116	19	56.6	30	59	53.8	
14	116	15	6.3	31	3	32.6	
15	116	8	17.9	31	11	30.9	
16	116	2	49.8	31	11	23.9	
17	115	57	56.5	31	15	45.7	
18	115	55	6.0	31	17	18	
19	115	54	39.4	31	19	37.0	
20	115	52	34.8	31	19	25.7	
1	115	48	57.6	31	19	311	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero 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 el 15 de mayo de 1965; esta veda se clasifica como tipo III, la cual permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. 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 y cuenta con el Comité Técnico de Aguas Subterráneas, (COTAS) de San Rafael, A.C., instalado el 11 de agosto de 1999.

En una pequeña porción al oriente del acuífero se localiza el Parque Nacional Sierra de San Pedro Martir, decretado el 26 de abril de 1947.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el territorio que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación; entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE SAN RAFAEL, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE, elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. en 1977 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos.

Entre sus conclusiones más importantes destacan que el volumen de extracción de agua subterránea era de 7.0 hm³/año, destinados casi en su totalidad a la agricultura; en tanto que su recarga se estimó en 6.4 hm³ anuales. Los valores de transmisividad obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo variaron de 2×10^{-4} a 9×10^{-2} m²/s, con caudales de extracción de 0.5 a 28 lps, lo que refleja una permeabilidad variable de los materiales que constituyen el acuífero. En cuanto a la familia de agua predominante, se determinó la mixta-clorurada, con problemas de salinidad para el uso agrícola. La concentración de sólidos totales disueltos oscilaba entre los 900 y 5800 ppm. De manera general, los pozos presentaron mejores condiciones de calidad que las norias.

CENSO DE APROVECHAMIENTOS PARA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, 1998, Realizado por la Gerencia Regional Península de Baja California. Registró la existencia de 240 obras, de las cuales sólo 141 estaban activas (79 pozos, 61 norias y 1 manantial) y los 99 restantes inactivas, que se incrementaron de 58 a 99 en el periodo de 1977 a 1998. Los niveles estáticos varían de 0.80m a 12.10 m, los valores mayores se registraron cerca del Ejido Benito Juárez y los menores en la zona costera.

La elevación de los niveles estáticos fluctuaba de 1.0 a 17 msnm; en la zona de confluencia de los arroyos Seco y San Rafael, la elevación de los niveles estáticos fue de 60 msnm. Las mayores elevaciones se registraron en la zona de recarga de Arroyo San Rafael con 170 msnm. La evolución de los niveles estáticos presentó fuertes variaciones estacionales, como producto de los periodos de extracción generados por los ciclos agrícolas, aunque no se tuvieron suficientes evidencias para identificar conos de abatimiento.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS EL ROSARIO, SAN RAFAEL Y SAN VICENTE. Elaborado por la empresa Estudios y Proyectos en Ingeniería, S.A de C.V. en 2007. Establece el número de pozos que conforman la red para el monitoreo de la calidad y cantidad del agua subterránea. Con respecto a la concentración de sólidos totales disueltos (STD), su valor variaba de 570 a 1280 ppm; los valores más altos se registraron en la zona costera. La evolución del nivel estático en el periodo 1998-2007 varió de -2 a -6, en la parte alta del acuífero ubicada entre los ejidos Alfredo V. Bonfil y Benito Juárez.

Hacia la zona costera se registran los valores de mayor de evolución, que alcanzan los 20 m, lo que representa un ritmo de abatimiento local de 2.2 m por año, generado por un periodo de estiaje prolongado.

MANEJO INTEGRADO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ACUÍFERO SAN RAFAEL, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, realizado para la Comisión Nacional del Agua por la Universidad Autónoma de Baja California, 2009. El objetivo general de este estudio fue adaptar el desarrollo sustentable de la región a la disponibilidad del agua, enmarcado en el contexto de la actual política nacional hidráulica. Mediante trabajos de campo que incluyen el censo e hidrometría, piezometría, nivelación de brocales, ejecución de pruebas de bombeo y sondeos geofísicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga media anual y determinar su disponibilidad.

Este trabajo constituye la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes. Debido que dicho estudio concluye con la formulación de un Plan de Manejo Integrado, considera otras actividades como la participación en talleres de planeación participativa, caracterizar y proyectar la demanda y la disponibilidad, construir un modelo de simulación de flujo subterráneo para evaluar diferentes escenarios de manejo del agua, estimar la relación costo-beneficio de la sobreexplotación, simular diferentes escenarios paramétricos concertados con los usuarios, definir acciones concretas de reducción de la demanda, de manejo de la disponibilidad y de mejora de la recarga; así como evaluar en términos técnicos, económicos, sociales, institucionales y normativos las diferentes opciones de manejo del recurso hídrico.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se localiza en la porción oriental de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California (Raisz, 1964), Subprovincia Sierra de San Pedro Mártir, la cual está representada en todo su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega *et al.*, 1992).

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

Por ejemplo, las rocas calizas que afloran en la región muestran una gran resistencia a la erosión, que en ocasiones forman lomeríos y escarpes escalonados de diferentes alturas, mientras que las rocas intrusivas forman grandes montañas con cañones profundos y estrechos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el área presenta a nivel regional, una gran variedad de climas:

Clima semiseco: Subtipo templado, con temperatura media anual de 12° C a 18° C, verano fresco, régimen de lluvia en invierno. Clima muy seco o desértico: subtipo templado, con temperatura media anual de 15° C a 18° C, verano fresco; régimen de lluvias en invierno, poco extremoso y nieblas frecuentes. Subtipo semicálido, de temperatura media anual que varía de los 18° C a 22° C, verano fresco que se extiende en la base de las montañas a altitudes menores de 800 msnm y régimen de lluvias en invierno. Subtipo cálido, con temperatura media anual de 22° C, régimen de lluvias en invierno y extremoso. Clima templado: subtipo húmedo, lluvias en invierno; clima mediterráneo; verano cálido poco extremoso. Subtipo cálido, lluvias en invierno con verano largo y fresco. Se presenta sobre las laderas de las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir, entre los 1,000 y 2,000 msnm.

Para el análisis estadístico de las variables climatológicas se utilizaron los registros de las estaciones San José, Tepic, San Rafael, Ejido Emilio López Zamora y Ejido México, para el periodo 1984- 2009. De acuerdo con estos datos, mediante el método de polígonos de Thiessen se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura son de **164 mm** y **16.5 °C**, respectivamente; en tanto que la evaporación potencial promedio es de **1,580 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 1, denominada “Baja California Noroeste”, dentro de la cuenca hidrográfica del río San Rafael, está integrada en la Subprovincia Fisiográfica identificada como Sierra de San Pedro Martir, correspondiente a la Provincia Regional Sierra Cristalina de Baja California (Manuel Álvarez Jr).

El río San Rafael se origina a una altitud mayor de 2,800 msnm, en la Sierra de San Pedro Martir, después de una distancia inicial de recorrido con orientación SE-NW, continúa por un largo trecho en franca dirección Oeste, aproximadamente hasta Colonet, donde sufre otro cambio de dirección, ahora hacia el SW para desembocar finalmente en el Océano Pacífico. La cuenca está formada por una red de escorrentimientos superficiales que se originan principalmente en la porción sureste, en forma general los afluentes de la margen derecha son de mayor longitud que los de la margen izquierda, los arroyos más importantes son el Pinacate, El Carrizo y Arroyo Seco, que al llegar al valle, recibe el nombre de Arroyo de San Rafael.

A lo largo del cauce principal recorre una longitud de 100 kilómetros. La cuenca total hasta su desembocadura en el Océano Pacífico tiene una superficie de 1,363 Km², de los cuales 60.0 Km² corresponden a la superficie acuífera, equivalente al 4.40 % de la superficie total de la cuenca.

3.4 Geomorfología

El acuífero se encuentra enmarcado por montañas complejas, constituidas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que conforman un gran bloque con pendiente suave hacia el occidente y con un frente oriental abrupto. Tiene una orientación predominante noroeste-sureste y se encuentra disectada por angostos valles de origen tectónico que han sido modelados por la erosión.

Pertenece a la vertiente del Océano Pacífico y es drenada por corrientes intermitentes que se van integrando a medida que se acercan a los valles labrados por las mismas. En general, se observa una etapa de madurez en el desarrollo geomorfológico de la región, sólo interrumpido por el rejuvenecimiento regional, evidenciado por el levantamiento gradual del frente oriental de la sierra de San Pedro Mártir.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, el valle de San Rafael se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, et. al. 1992), de edad mesozoica, de origen plutónico asociado a un ambiente de raíz de arco. Está conformado por tonalitas y granodioritas que se emplazaron del Cretácico al Cenozoico Tardío y tiene una extensión de más de 400 km², su intrusión causó metamorfismo en las rocas prebatolíticas, transformándolas a gneis y esquisto (figura 2). El fallamiento fuertemente escalonado que presenta la península de Baja California está relacionado con el desarrollo de los sistemas transformantes que dominan la tectónica regional (Dokka y Merriman, 1982; O'Connor y Chase, 1989).

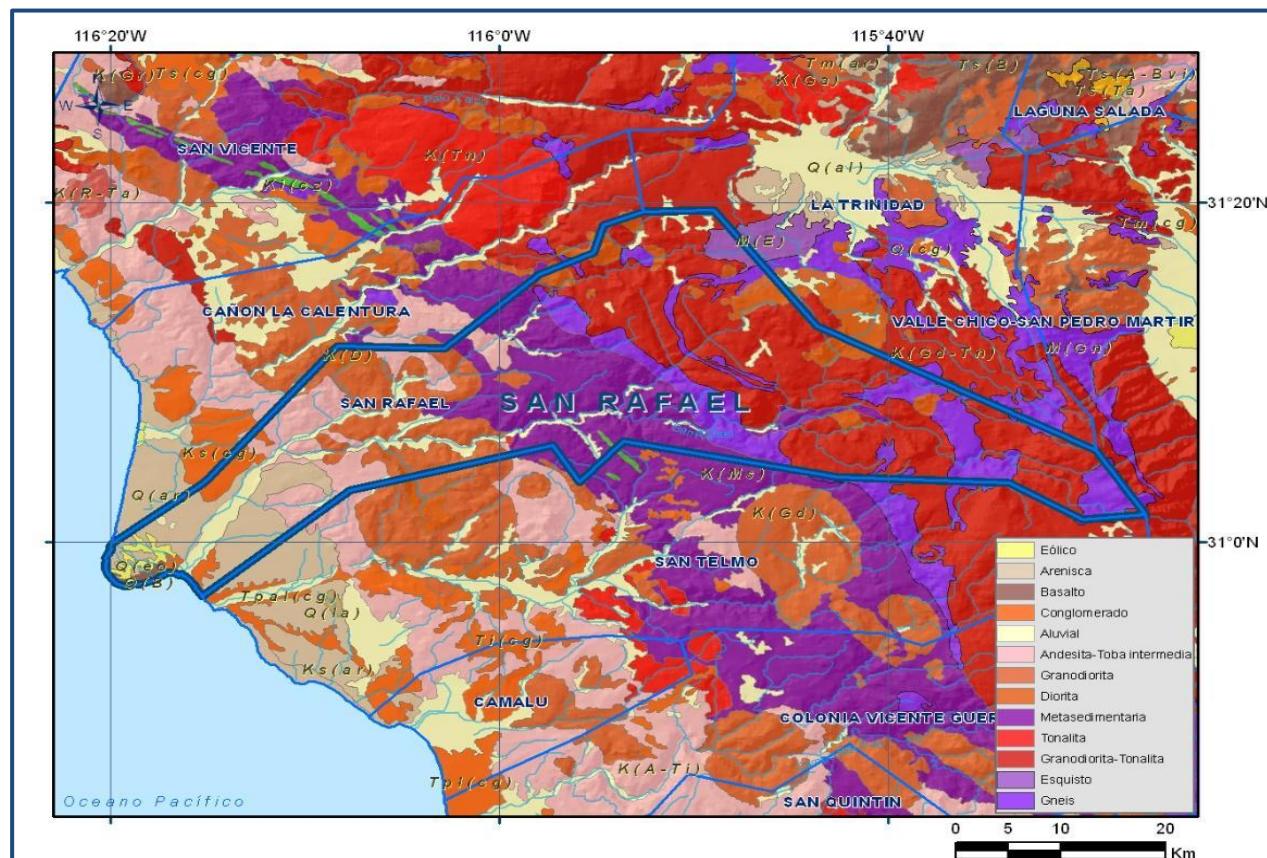


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En el área afloran rocas cuya edad varía del Paleozoico al Reciente. El Paleozoico está representado por rocas sedimentarias marinas con metamorfismo regional, las rocas del Mesozoico que afloran ampliamente corresponden a intrusivos de composición ácida e intermedia, así como rocas sedimentarias marinas que manifiestan metamorfismo regional de bajo grado. El Cenozoico está caracterizado por importantes eventos volcánicos, que presentan un amplio rango de composiciones, depósitos fluviales, marinos y eólicos y suelos.

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

Formación San Hipólito. Conformada por rocas carbonatadas, clásticas y volcánicas que fueron sometidas a un proceso de dinamometamorfismo así como a un proceso de metamorfismo de contacto, generando como resultado filitas, esquistos, skarns y hornfels. La orientación principal de su foliación es noroeste-sureste. Esta unidad sedimentaria está ligada a una secuencia de arco insular, de 200 m de espesor en promedio. A diferencia de la unidad paleozoica, presenta topografía abrupta, ambas conforman el cinturón metamórfico prebatolítico, que tiene sus principales afloramientos en las sierras de Juárez y San Pedro Martir.

Formación Alisitos. Secuencia vulcanosedimentaria que en el área consta de cuatro miembros, de abajo hacia arriba:

- Tobias en capas delgadas con Sills de diorita.
- Calizas y Areniscas
- Rocas volcánicas y vulcanoclásticas de composición intermedia.
- El miembro superior consiste de calizas biógenas que hacia la cima se interdigitan con rocas volcánicas de composición intermedia.

Consiste en interestratificaciones de rocas calcáreas y derrames de composición dacítico-riolítica. Las calizas se presentan en estratos masivos a delgados, predominando estos últimos, de color gris oscuro a claro, con lentes de limolita calcárea y bajo contenido de arcillas.

La caliza está silicificada y presenta baja grado de metamorfismo. Su fracturamiento es intenso y en algunas áreas tiene aspecto lajoso. La unidad calcárea está interestratificada también con tobas líticas de composición ácida. En las áreas cercanas al cuerpo intrusivo presenta aureola de metamorfismo.

En los alrededores del Arroyo Santo Domingo y hacia el norte y sur del área, se encuentra una secuencia metasedimentaria formada por pizarras, esquistos, metaareniscas, meta-conglomerados, calizas y mármol, afectada por diques andesíticos o fuertemente plegada.

Estas unidades han sido correlacionadas con la Formación Alisitos (Gastil, 1975), pero teniendo en cuenta sus características litológicas y estructurales, podrían ser más antiguas.

Batolito Cretácico de Baja California. Grupo de cuerpos intrusivos de composición granítico-tonalítica-granodiorítica, que localmente están constituidos por plutones de diorita y gabro que intrusionan a las formaciones San Hipólito y Alisitos, produciendo en ellas halos de metamorfismo. Esta unidad conforma al cinturón batolítico que ha dividido a las rocas del Cretácico y Jurásico como rocas post y pre batolíticas, respectivamente.

Formación Rosario. Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Se presenta poco consolidada, descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico), y cuyo límite oriental es la denominada “Línea Santillana-Barrera” (Gastil et al, 1975), que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos. Tiene un espesor aproximado de más de 750 m y su edad corresponde al Maestrichtiano. Sus principales afloramientos se localizan sobre la costa del Pacífico.

Formación Sepultura. Intercalación de areniscas y conglomerados de origen marino en su base y de tipo continental en la cima. La parte inferior está en contacto con la Formación Rosario de manera concordante y transicional, en ocasiones no se distingue el límite entre ambas unidades. Su espesor es de 400 m aproximadamente y se le asigna una edad que corresponde al Eoceno Inferior- Paleoceno. Morfológicamente forma lomeríos suaves de poca altura. Se encuentra distribuida en la porción noroccidental y occidental de la península.

Formación La Misión. Unidad constituida por areniscas de origen eólico y fluvial, de grano medio, cementadas con calcita. Ocasionalmente presentan estratificación cruzada. Sobreyaace en forma concordante a la Formación Sepultura así como en discordancia angular a las rocas paleozoicas y mesozoicas del oriente de la península. Su espesor promedio es de 150 m y tiene una edad Mioceno Medio; la morfología que presenta está determinada por los cuerpos volcánicos que la sobreycacen. Se considera que estos sedimentos, son el resultado de las primeras transgresiones marinas producidas por la apertura del Golfo de California.

Unidad Volcánica. Representada por rocas piroclásticas de composición ácida, derrames andesíticos y dacíticos, casi todos cubiertos por basaltos plio-cuaternarios. Por su posición dentro de la columna estratigráfica se le ha asignado una edad Mioceno-Plioceno. Su expresión morfológica es de mesetas cortadas.

Formación Imperial. Compuesta por clastos y carbonatos, areniscas, conglomerados, y depósitos sedimentarios dispuestos en estratos delgados. Se le ha asignado una edad del Plioceno y forma pequeñas lomas de pendiente suave.

Depósitos Cuaternarios. Constituidos por sedimentos continentales del tipo aluvial y marino de tipo costero, incluso depósitos deltaicos y de llanura de inundación. Sus espesores son muy variados y se encuentran rellenando valles y zonas bajas en toda la península, sus mayores extensiones se localizan en el noreste de la misma.

4.2 Geología estructural

Las estructuras más sobresalientes en el área son los emplazamientos batolíticos mesozoicos que afectaron a las secuencias paleozoicas y mesozoicas en una dirección NW-SE.

En general, el área ha sido perturbada por diversos fenómenos tectónicos en diferentes épocas entre los que se pueden distinguir: (a) efectos de esfuerzos de compresión; (b) metamorfismo dinámico regional; (c) intrusiones graníticas; y (d) esfuerzos de tensión que están mejor representados en las secuencias volcánicas cenozoicas.

Los emplazamientos batolíticos y la secuencia mesozoica muestran fallamiento normal de dimensiones considerables con dirección preferencial NW-SE, así como algunas fallas de corrimiento lateral. Se observa un segundo sistema de fallas normales ocurrido en el Paleógeno-Neógeno al que se asocian derrames lávicos de composición máfica.

En general, para el Paleozoico se reconocen rocas producto de procesos metamórficos regionales de alto grado. Representando al mesozoico se presentan importantes intrusiones batolíticas de composición ácida-intermedia, que son producto de la subducción y fusión de la placa Farallón debajo de la placa Americana, también incluye rocas metamórficas con lineamiento principal NW-SE.

El Cenozoico es un escenario de importantes eventos volcánicos que originaron secuencias de carácter efusivo, así como grandes e importantes movimientos debidos a esfuerzos de distensión que provocaron la separación de la península de Baja California.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación geológica y las características de las unidades litológicas que conforman el acuífero, es posible definir tres unidades hidrogeológicas, clasificadas de acuerdo con sus propiedades para transmitir, almacenar y ceder el agua subterránea:

Unidad impermeable: rocas de baja a nula permeabilidad, que se distribuyen a lo largo del valle, favoreciendo la colección y encauzamiento del agua pluvial que forma los depósitos aluviales de alta permeabilidad. Esta unidad está conformada por rocas ígneas extrusivas (derrames andesíticos, de edad mesozoica y basaltos paleógeno-neógenos), rocas intrusivas de composición ácida intermedia de edad cretácica y por rocas metasedimentarias.

Unidad semipermeable: constituida por materiales consolidados y semiconsolidados del Paleoceno. Presenta horizontes masivos de baja permeabilidad conformados principalmente por conglomerados con una matriz arcillo-arenosa y areniscas. Se presentan en las márgenes de la parte baja del arroyo San Rafael, desde el poblado Colonet hacia la costa. Esta unidad subyace a la unidad permeable, constituyendo así un acuitardo debido a su baja productividad (TMI, 1977).

Unidad permeable: material granular no consolidado (depósitos aluviales), presenta alta permeabilidad y conductividad hidráulica. Está constituida principalmente por gravas, arenas y limos generados a partir de rocas preexistentes. En las zonas donde afloran rocas intrusivas de composición intermedia a básica es común observar, en los lechos de arroyos, extensos lentes de arcillas rojas, que limitan las propiedades hidráulicas de esta unidad, tal como sucede en las zonas de la Loma El Picudo y Las Tres Palmas. De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que el acuífero está constituido, en su porción superior, por depósitos aluviales de granulometría variada (gravas, arenas, limos y localmente arcillas), en general de alta permeabilidad y conglomerados de permeabilidad media.

El espesor de esta unidad superior es de algunas decenas de metros, en la porción costera y el cauce de los arroyos, hasta desaparecer hacia los flancos de las montañas. La parte inferior se aloja en rocas sedimentarias (areniscas) y volcánicas (andesitas y tobas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y barreras del flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico, están conformados por las mismas rocas fracturadas, cuando a profundidad se cierran las fracturas, así como por rocas ígneas intrusivas y metamórficas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Con la interpretación de la geología del subsuelo, sondeos geofísicos y las características de las unidades litológicas que lo conforman, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, de **tipo libre**, constituido en su porción superior por un medio granular conformado por depósitos aluviales y conglomerados, y otro fracturado subyacente alojado en areniscas y rocas volcánicas. Los depósitos granulares son los que se explotan actualmente y su espesor no supera los 40 m.

5.2 Parámetros hidráulicos

Los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos indican que los valores de transmisividad varían de manera puntual de **0.2×10^{-3}** hasta **$90.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** (TMI, 1977), lo que da una idea de la heterogeneidad de los materiales aluviales.

Los caudales específicos varían entre 0.5 y 28.0 lps/m. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, el coeficiente de rendimiento específico se determinó indirectamente y su valor oscila entre 0.0026 y 0.07. Para fines del balance, se adoptó un valor de 0.07.

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2009, se ejecutaron 2 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 10 a 24 horas. De los resultados de su interpretación por diferentes métodos analíticos convencionales (Theis, Neuman, Hantush), se determina que los valores de transmisividad varían de **$3.5 \text{ a } 14.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , que se encuentran dentro del rango de valores obtenidos en estudios previos.

5.3 Piezometría

Para el acuífero San Rafael se cuenta con información histórica de mediciones piezométricas, que corresponden a los años 1976, 1980, 1998, 2007 y 2009. Sin embargo, las que corresponden a los años 1998, 2007 y 2009, son las que tienen mayor distribución espacial y corresponden a la misma época del año.

Debido a que las configuraciones muestran una geometría muy semejante, aunque se describen las correspondientes a 2007 y 2009, únicamente se presentan las configuraciones del último año.

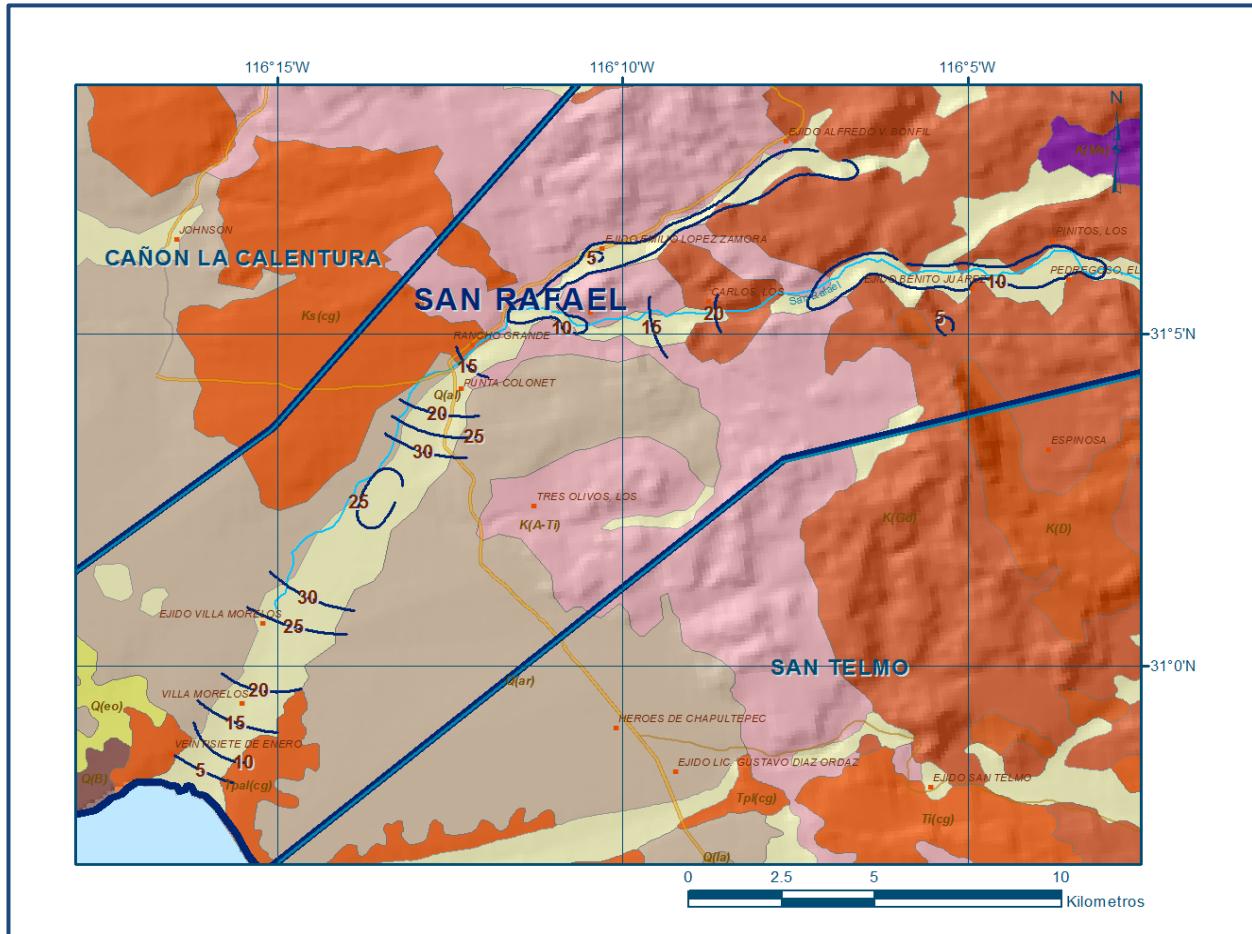
5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el 2007 muestra valores que varían de 4 a 29 m, incrementándose conforme se asciende topográficamente desde la zona costera a lo largo del cauce del río San Rafael. Los valores más profundos se registraron agua abajo del poblado Punta Colonet, en las zonas de Villa Morelos y San Miguel, en donde se practica la agricultura extensiva.

Las partes altas del valle muestran profundidades al nivel freático entre 6 y 18 m. Para el 2009 se presenta la misma tendencia de la configuración, con valores extremos de 6 a 27 m. Las menores profundidades se registraron hacia cerro El Pedregoso y el Ejido Alfredo V. Bonfil; en tanto que las mayores se localizan de la zona media del acuífero, entre los ejidos Villa Morelos y 27 de enero y hacia la costa, con valores que varían de 18 a 27 m (figura 3).

Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2009)



5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con los valores registrados en 2007, la elevación del nivel estático varía de -10.0 a 133.0 msnm. Los valores negativos (bajo en nivel medio del mar mbnm) se registran a 5 km aguas arriba de la línea de costa, en el Ejido Villa Morelos, desde donde se incrementan gradualmente, al igual que los valores de profundidad, conforme se asciende topográficamente.

Para el 2009 las elevaciones del nivel estático variaron de 10 mbnm, en los alrededores de los poblados 27 de Enero, Villa Morelos y Ejido Villa Morelos; a 130 msnm cerca del poblado El Pedregoso (figura 4). La relocalización de pozos de la zona costera a las áreas de recarga, los periodos de estiaje prolongados y la extracción de agua subterránea salobre en la franja costera para alimentar plantas desaladoras, han provocado intrusión marina.

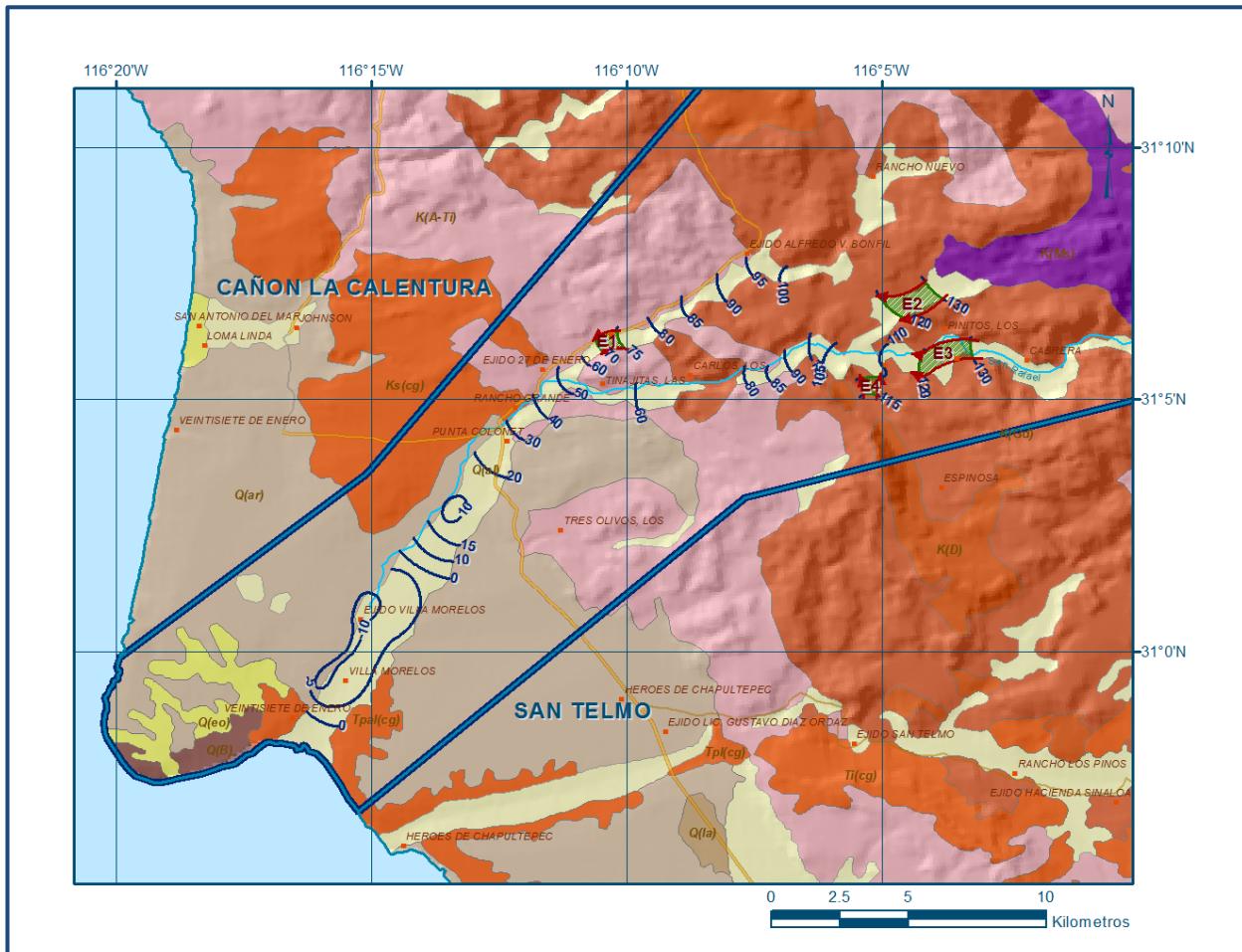


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, para el periodo 2007-2009, se registraron abatimientos de 1.0 a 5.0 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.5 a 2.5, con un promedio de 1.5 m.

De acuerdo con el registro histórico de la piezometría, se ha observado que el acuífero responde rápidamente al efecto de la recarga cuando se producen lluvias extraordinarias, descendiendo los niveles durante los períodos de estiaje. Existen dos zonas especialmente vulnerables a lo largo de la historia piezométrica de este acuífero donde se registran los abatimientos: la primera se localiza cerca de Punta Colonet, entre San Miguel, Rancho Los Arbolitos y Rancho Los Caballos; la segunda entre los ranchos Miramar, Buenavista y Villa Morelos.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2009, recolectaron en total 10 muestras de aguas subterráneas, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, oxígeno disuelto, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, coliformes fecales y totales, magnesio, arsénico, boro y litio entre otros.

De manera general, fuera de la zona afectada por intrusión marina, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 480 a 1300 mg/l, que en su límite máximo rebasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, las concentraciones de los demás constituyentes químicos disueltos cumplen con la norma referida.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C_2) a baja (C_1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que son aptas para su uso en la agricultura sin restricciones en los cultivos ni en el tipo de suelo. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron como familias dominantes la bicarbonatada-cálcica (en las porciones suroriental y centro del acuífero) y bicarbonatada-sódica (en el extremo norte), que representan agua de reciente infiltración con una evolución normal a lo largo de la dirección preferencial del flujo subterráneo. Sólo en la zona costera donde se ubican los ejidos Villa Morelos y 27 de enero se presentan aguas de la familia sódico-clorurada.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos más reciente, realizado en 1998, se registró la existencia de 141 obras activas, de las cuales 79 son pozos y 62 norias. El volumen de extracción estimado en 2009 es de **18.6 hm³/año**, de los cuales el 18.0 hm³ (96.8%) se destinan para uso agrícola y 0.6 hm³/año (3.2%) para uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para los años 2007-2009, en un área de 57.3 km² del acuífero que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos.

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 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 de un acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, que se considera como recarga vertical (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo 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, dado que no existen poblaciones humanas importantes y el riego agrícola es tecnificado, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

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:

$$Eh + Rv - B = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Eh: Entrada por flujo subterráneo horizontal

Rv: Recarga vertical

B: Bombeo

ΔV : Cambio de almacenamiento

S: Coeficiente de almacenamiento

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para el 2009 (figura 4), en la que se identificaron los canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de las celdas, mediante la siguiente expresión:

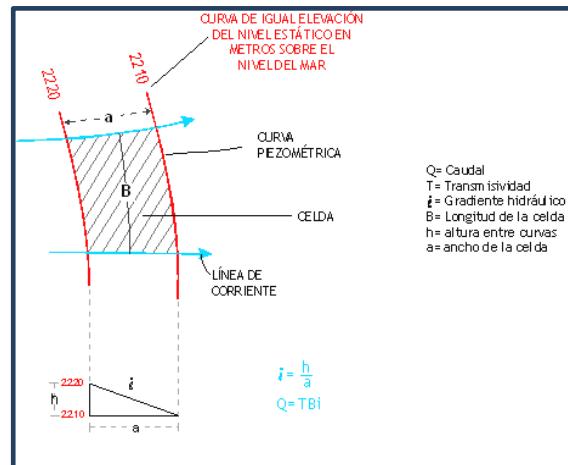
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo (m)

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

T: Transmisividad en el canal de flujo (m^2/s)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales de flujo definidos. El cálculo de volumen total por flujo subterráneo para el 2009 es de **7.4 hm³/año** (tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo 2009

CELDAS	ANCHO a (m)	LARGO B (m)	$h_2 - h_1$ (m)	GRADIENTE HIDRAULICO (i)	TRANSMISIVIDAD (T) (m^2/s)	CAUDAL Q m^3/s	VOLUMEN $hm^3/año$
E1	970	950	5	0.0052	0.010	0.048969	1.5
E2	1560	1040	10	0.0064	0.010	0.066667	2.1
E3	1950	950	10	0.0051	0.015	0.073077	2.3
E4	1300	800	5	0.0038	0.015	0.046154	1.5
						TOTAL	7.4

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas subterráneas se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B). No existen salidas por flujo subterráneo horizontal, debido a que los pozos que se localizaban en la zona costera provocaron intrusión marina y fueron relocalizados en el centro del valle, donde ahora han generado un cono de abatimiento; tampoco se presenta evapotranspiración de niveles someros; manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **18.6 hm³ anuales**.

7.2.2 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

El cambio de almacenamiento se estimó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2007-2009, Para este periodo el abatimiento promedio en el área de balance de 57.3 km² fue de 3.1 m; que representa un ritmo anual de 1.5 m. De esta manera, considerando un coeficiente de almacenamiento estimado (rendimiento específico) de 0.07, el cambio en el volumen almacenado es: $\Delta V(S) = 57.3 \text{ km}^2 (-3.1 \text{ m}) (0.07) = -177.7 \text{ hm}^3 (0.07) = 12.4 \text{ hm}^3$, que equivalen a un promedio anual **6.2 hm^{3/año}**.

Solución de la ecuación de balance

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

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

Sustituyendo valores:

$$Rv = 18.6 - 7.4 - 6.2$$

$$\mathbf{Rv = 5.0 \text{ hm}^3/año}$$

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

$$R = Rv + Eh$$

$$R = 5.0 + 7.4$$

$$\mathbf{R = 12.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **12.4 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida es de **DNC = 0.0 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **42,713,671 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.

$$\text{DMA} = R - DNC - VEAS$$

$$\text{DMA} = 12.4 - 0.0 - 42.713671$$

$$\text{DMA} = -30.313671 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **30,313,671 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos, 1977. Estudio Geohidrológico del Valle de San Rafael, Estado de Baja California Norte. Elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería

Comisión Nacional del Agua, 2007. Actualización de Mediciones Piezométricas en los Acuíferos El Rosario, San Rafael y San Vicente. Elaborado por la empresa Estudios y Proyectos en Ingeniería, S.A de C.V. en 2007.

Comisión Nacional del Agua, 2009. Manejo Integrado de las Aguas Subterráneas en el Acuífero San Rafael. Realizado por la Universidad Autónoma de Baja California.