CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y

Ordenamiento de Acuíferos

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Telmo (0218), Estado de Baja California

Publicada en el Diario Oficial de la Federación

20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE BAJA CALIFORNIA							
0218	SAN TELMO	8.5	0.0	24.370174	10.5	0.000000	-15.870174

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO SAN TELMO (0218), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

México, D.F., octubre de 2010

CONTENIDO

1. GENERALIDADES 1
Antecedentes 1
1.1. Localización 1
1.2. Situación administrativa del acuífero 3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 4
3. FISIOGRAFÍA 5
3.1. Provincia fisiográfica 5
3.2. Clima 5
3.3. Hidrografía 6
3.4. Geomorfología 6
4. GEOLOGÍA 6
4.1. Estratigrafía 7
4.2. Geología estructural 10
4.3. Geología del subsuelo 10
5. HIDROGEOLOGÍA 11
5.1. Tipo de acuífero 11
5.2. Parámetros hidráulicos 11
5.3. Piezometría 12
5.4. Comportamiento hidráulico 12
5.2.1. Profundidad del nivel estático 12
5.2.2. Elevación del nivel estático 13
5.2.3. Evolución del nivel estático 13
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 15
7.1. Entradas 16
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 16
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 16
7.1.3. Recarga Inducida (Ri) 16
7.2. Salidas 16
7.2.1. Bombeo (B) 18
7.2.2.Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 18
7.2.2. Evapotranspiración (ETR) 18
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS) 20
8. DISPONIBILIDAD 21
8.1. Recarga total media anual (Rt) 21
8.2. Descarga Natural Comprometida (DNCOM) 21
8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS) 21
8.4. Disponibilidad de aguas Subterráneas (DAS) 22
9. BIBLIOGRAFÍA 23

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Telmo, definido con la clave 0218 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción noroccidental del estado de Baja California, cubriendo una superficie aproximada de 1,288 km^2. Se encuentra delimitado por los paralelos 30º 50’ y 31º 06’ de latitud norte y los meridianos 115º 26’ y 116º 15’ de longitud Oeste.

Limita al norte con el acuífero San Rafael, al este con el acuífero Valle Chico-San Pedro Mártir, al sur con los acuíferos Colonia Vicente Guerrero y Camalú y al oeste con el Océano Pacífico.

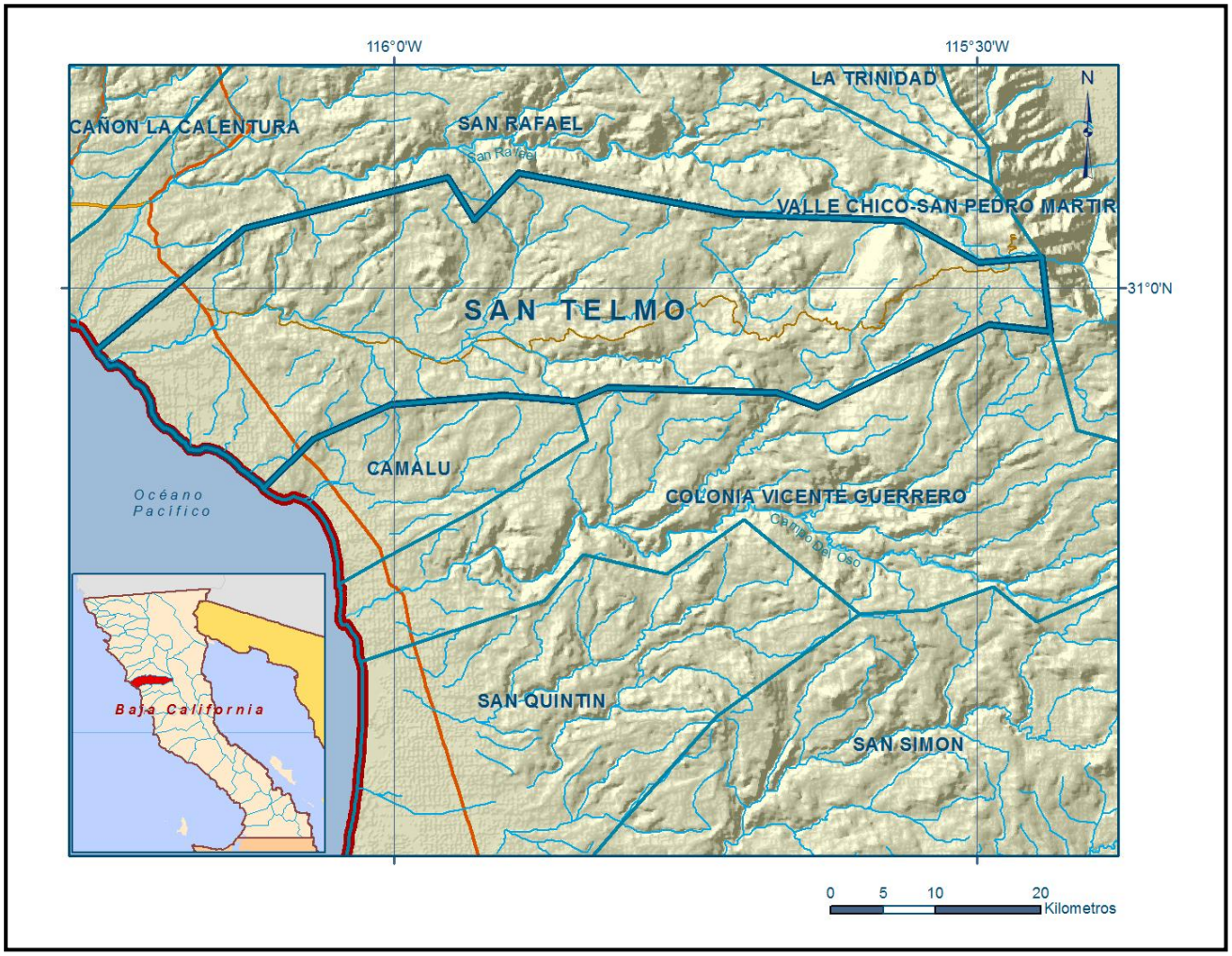


Figura 1. Localización del acuífero

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 de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 0218 SAN TELMO

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	26	15.4	30	57	47.8	
2	115	29	24.4	30	58	8.6	
3	115	38	11.5	30	53	54.5	
4	115	40	19.4	30	54	38.7	
5	115	49	0.4	30	54	54.7	
6	115	50	41	30	54	12.8	
7	115	54	23	30	54	30.2	
8	116	0	10	30	54	1.1	
9	116	4	4.2	30	52	16.7	
10	116	6	42.5	30	49	44.6	DEL 10 AL 11 POR LA LÍNEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
11	116	15	16.1	30	56	49.9	
12	116	7	41.5	31	3	3.8	
13	115	57	12.5	31	5	42.2	
14	115	55	53	31	3	31.8	
15	115	53	36.7	31	5	55.3	
16	115	42	32.9	31	3	50.4	
17	115	33	45.6	31	3	29	
18	115	29	57.6	31	1	21	
19	115	26	43	31	1	36.3	
1	115	26	15.4	30	57	47.8	

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 2010, el municipio de Ensenada se clasifica como zona de disponibilidad 4. 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) San Telmo, instalado el 11 de agosto de 1999. El usuario principal del agua subterránea es el agrícola. En la porción oriente del acuífero se localiza el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, instalado el 26 de abril de 1947. En su territorio no este existe ningún distrito o unidad de riego.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el territorio que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios estudios hidrogeológicos de evaluación, se han desarrollado varios, algunos a escala regional, de los cuales a continuación se citan los más importantes:

BALANCE GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE SAN TELMO EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la empresa INGESA para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1968. En este trabajo se utilizó un método indirecto, para conocer la recarga del acuífero y plantear un balance de aguas subterráneas; aplicando la técnica de U.S. Soil Conservation Service estimó que la recarga potencial anual del acuífero del arroyo de San Telmo era de 8, 000 m^3 anuales.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL VALLE DE SAN TELMO EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE. **Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería S.A. (TMI) para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1974**. En este estudio se analizaron 10 cortes litológicos de pozos de exploración, perforados por la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas entre 1971 y 1974, además se realizaron tres pruebas de aforo; para determinar las características geohidrológicas de la Mesa de San Telmo; se censaron 33 obras de las cuales 18 eran norias y 15 pozos; se calculó que la recarga del acuífero, a lo largo del arroyo de San Telmo, era de 4.0 hm^3 anuales los cuales eran extraídos en su totalidad en la zona agrícola del Rancho Sinaloa y áreas adyacentes.

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 Hidráulicos. Entre sus conclusiones más importantes destacan que el volumen de extracción de agua subterránea era de 7.0 hm^3/año, destinados casi en su totalidad a la agricultura; en tanto que su recarga se estimó en 6.4 hm^3 anuales. Los valores de transmisividad obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo varían de 2×10^{-4} a 9×10^{-2} m^2/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.

ACTUALIZACION DE MEDICIONES PIEZOMETRICAS 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 la red de monitoreo del acuífero, identificando aquellos aprovechamientos con mayor numero y confiabilidad de datos. 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.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS SAN VICENTE Y SAN TELMO, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. 2010, realizado por la Universidad Autónoma de Baja California para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, toma de muestra de agua para análisis fisicoquímicos y reconocimientos geológicos, fue posible platear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas para la República Mexicana, realizada por Raisz (1964), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en la porción oriental de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, Subprovincia Sierras de Baja California Norte, la cual está representada en todo su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega *et al*., 1992). La mejor exposición de esta subprovincia está representada por las sierras Juárez, San Felipe y San Pedro Mártir. Esta última, con una elevación máxima de 3,078 msnm en el cerro Pico del Diablo. Se reconoce una gran variedad de tipos litológicos, estructuras y 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 E. García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, en la región predominan los climas muy áridos o secos BW (con lluvias en verano, invierno y escasas todo el año), subtipos muy secos, muy cálidos y cálidos: BW (h´) hw (x´); Secos BSo (con lluvias en invierno), subtipos secos mediterráneos templados: BSKs y BSKs (x´); así como climas templados C, subtipos con lluvia invernal (Cs).

Para el análisis estadístico de las variables climatológicas se utilizaron los registros de 7 estaciones: San José, San Vicente, Tepic, San Rafael, Emilio López Zamora y Ejido México, para el periodo 1984-2006. Con base en ellos se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura son de **228.2 mm y 16.5 °C**, respectivamente; en tanto que la evaporación potencial promedio es de **1,580 mm anuales**. Las mayores precipitaciones se registran en el periodo diciembre a marzo; la temperatura muestra valores extremos de 40 y 4 °C

3.3. Hidrografía

El acuífero se localiza en su mayor extensión en la Región Hidrológica No. 1, denominada Baja California Noroeste, Subregión Hidrológica Río Tijuana, dentro de la cuenca del Arroyo las Animas-Arroyo Santo Domingo. Posee dos corrientes principales que son los arroyos Las Ánimas y Santo Domingo. El arroyo Las Ánimas que recorre 75 km a lo largo de su cauce principal, tiene una trayectoria general este-oeste y desemboca 6 km al oeste de Maneadero. El arroyo Santo Domingo nace en el parteaguas de la sierra San Pedro Mártir y está formado por varios torrentes, entre los que destacan el arroyo Valladares, Santa Cruz y Santo Domingo, que tienen su origen a más de 2,900 m de altura. Esta cuenca tiene como subcuencas intermedias la del Arroyo Santo Domingo, Río San Telmo, Río San Rafael, Arroyo Salado, Río San Vicente, Río Santo Tomás y Arroyo Las Ánimas.

3.4. Geomorfología

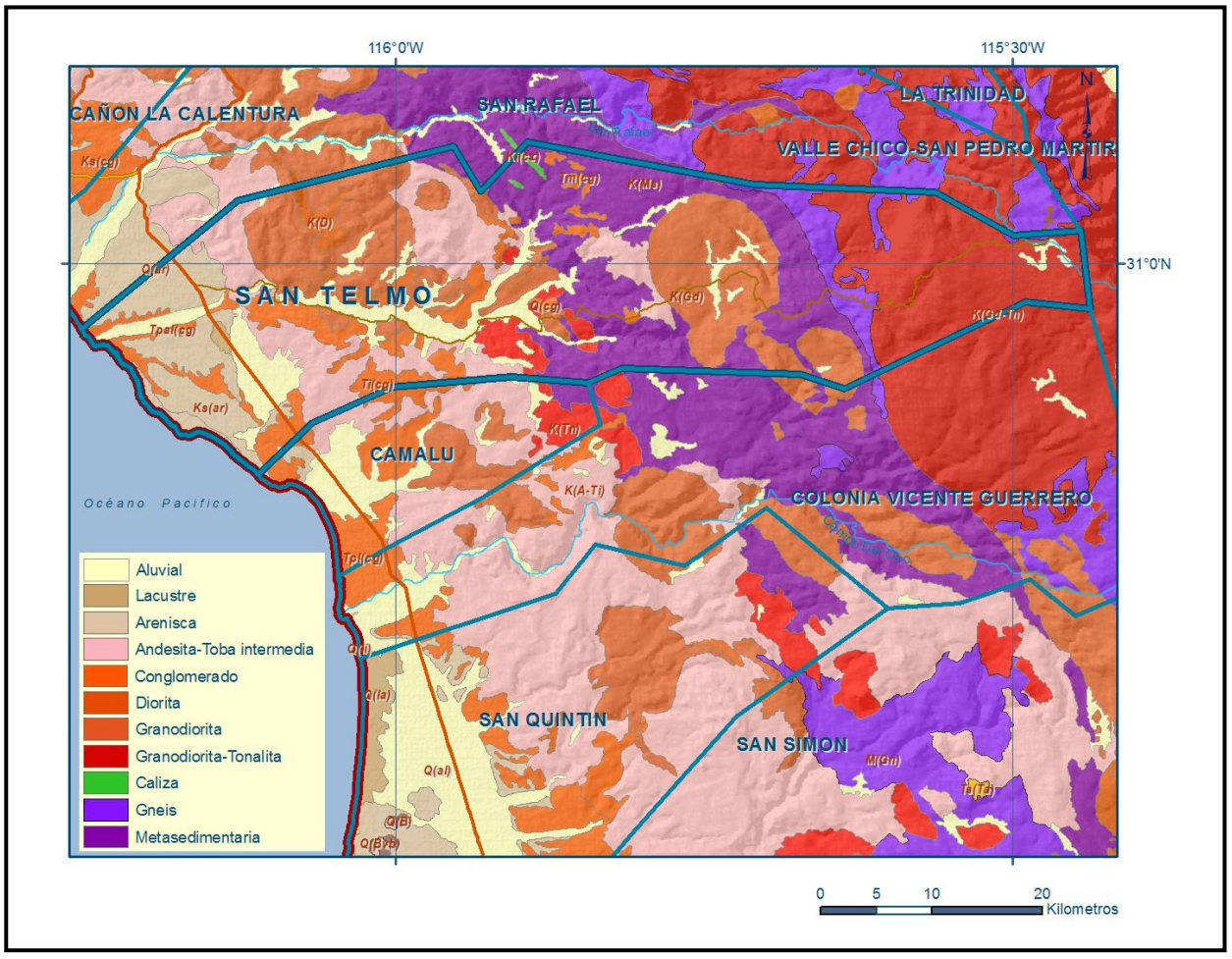
El acuífero se encuentra enmarcado por montañas complejas, constituidas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que conforman un gran bloque con pendiente suave hacia el occidente y con un frente oriental abrupto. Tiene una orientación predominante noroeste-sureste y se encuentra disectada por 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, solo interrumpido por el rejuvenecimiento regional, evidenciado por el levantamiento gradual del frente oriental de la sierra San Pedro Mártir.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la región se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, et. al. 1992), de edad Mesozoica, de origen plutónico y de un ambiente de raíz de arco. Este intrusivo, conformado por tonalitas y granodioritas, se desarrolló del Cretácico al Cenozoico tardío y tiene una extensión de más de 400 km^2. La intrusión causó metamorfismo a 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).

El acuífero San Telmo se constituye principalmente por rocas sedimentarias, volcánicas, metamórficas del tipo gneis y esquistos; sobresalen por la extensión de sus afloramientos las rocas intrusivas de composición ácida (tonalita), en menor proporción están las rocas del tipo basalto y andesita basáltica, riolita y dacita así como la formación Alisitos de origen sedimentario. Los depósitos aluviales y fluviales producto de la desintegración de las rocas ígneas y sedimentarias que rodean el cauce de ríos y arroyos, están constituidos principalmente por gravas arenas y limos, estos depósitos tienen características de porosidad y permeabilidad suficientes para formar el acuífero. La profundidad media del acuífero es de 40 m con un ancho promedio de 600 m.

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 o 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 (Tr–Jr). 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 Mártir.

Formación Alisitos (Kas). Secuencia vulcanosedimentaria que en el área consta de cuatro miembros, de abajo hacia arriba: tobas en capas delgadas con Sills de diorita; calizas y areniscas; rocas volcánicas y vulcanoclásticas de composición intermedia; y el miembro superior constituido por 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, meta-areniscas, 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 (Kr). 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 (Kr). 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 (Kr – Tr). 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 (Tr). Unidad constituida por areniscas de origen eólico y fluvial, de grano medio, cementadas con calcita. Ocasionalmente presentan estratificación cruzada. Sobreyace 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 sobreyacen. 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 (Tr): 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 (Qr): 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 de 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 NE-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. Esta Era incluye rocas metamórficas con lineamiento principal noroeste-sureste. 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 encausamiento 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 algunas areniscas. Se presentan en las márgenes de la parte baja del arroyo, 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, cuyo espesor conjunto varía 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 toba) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

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

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con la interpretación de la geología del subsuelo, las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar algunas decenas de metros en el centro del valle. Esta es la unidad que actualmente se explota, La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 4 a 12 horas. De los resultados de su interpretación por diferentes métodos analíticos convencionales, se determina que los valores de transmisividad varían de 0.5 a 3.5 $x10^{-3}$ m^2/s y los valores de transmisividad oscilan entre 8.7 x 10^{-5} y 1.3 $x10^{-3}$ m/s. Con respecto al coeficiente de almacenamiento, su valor promedio es 0.05 y el rendimiento específico varía de 0.0026 a 0.07, ambos parámetros fueron determinados en estudios previos.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea existe información para los años 1998 y 2010

5.4. Comportamiento hidráulico

5.2.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010 presenta valores que varían desde algunos metros en el cauce del arroyo Las Ánimas, en la parte baja de la cuenca, hasta 30 m, que se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle (figura 3). Los niveles estáticos someros, de 5 a 10 m, se registran en la parte baja de la cuenca, desde el poblado Héroes de Chapultepec, hacia la costa y son explotados por la gran cantidad de norias que existen; en tanto que los más profundos se presentan del poblado Hacienda Sinaloa hacia aguas arriba.

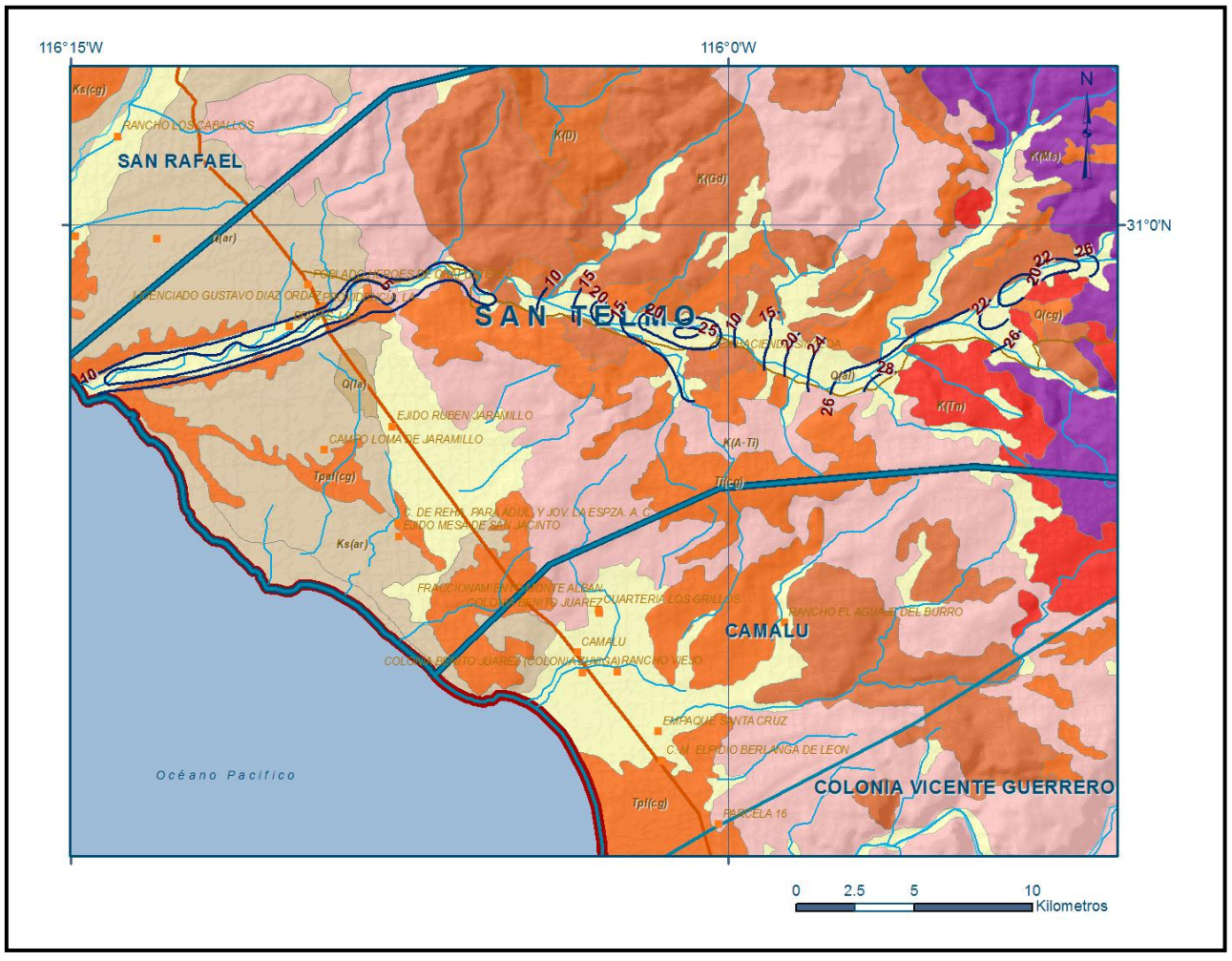


Figura 3. Profundidad al nivel estático (m), 2010

5.2.2. Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, registra valores que varían de 350 a 5 msnm. Las menores elevaciones, de 70 a 5 msnm, se registran en la zona occidental del acuífero, desde el poblado la Providencia hacia la costa. Las mayores elevaciones, de 200 a 350, se presentan en la porción alta de la cuenca del arroyo Las Ánimas, desde donde descienden gradualmente, al igual que la profundidad, por efecto topográfico hacia la costa (figura 4), mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo este-oeste

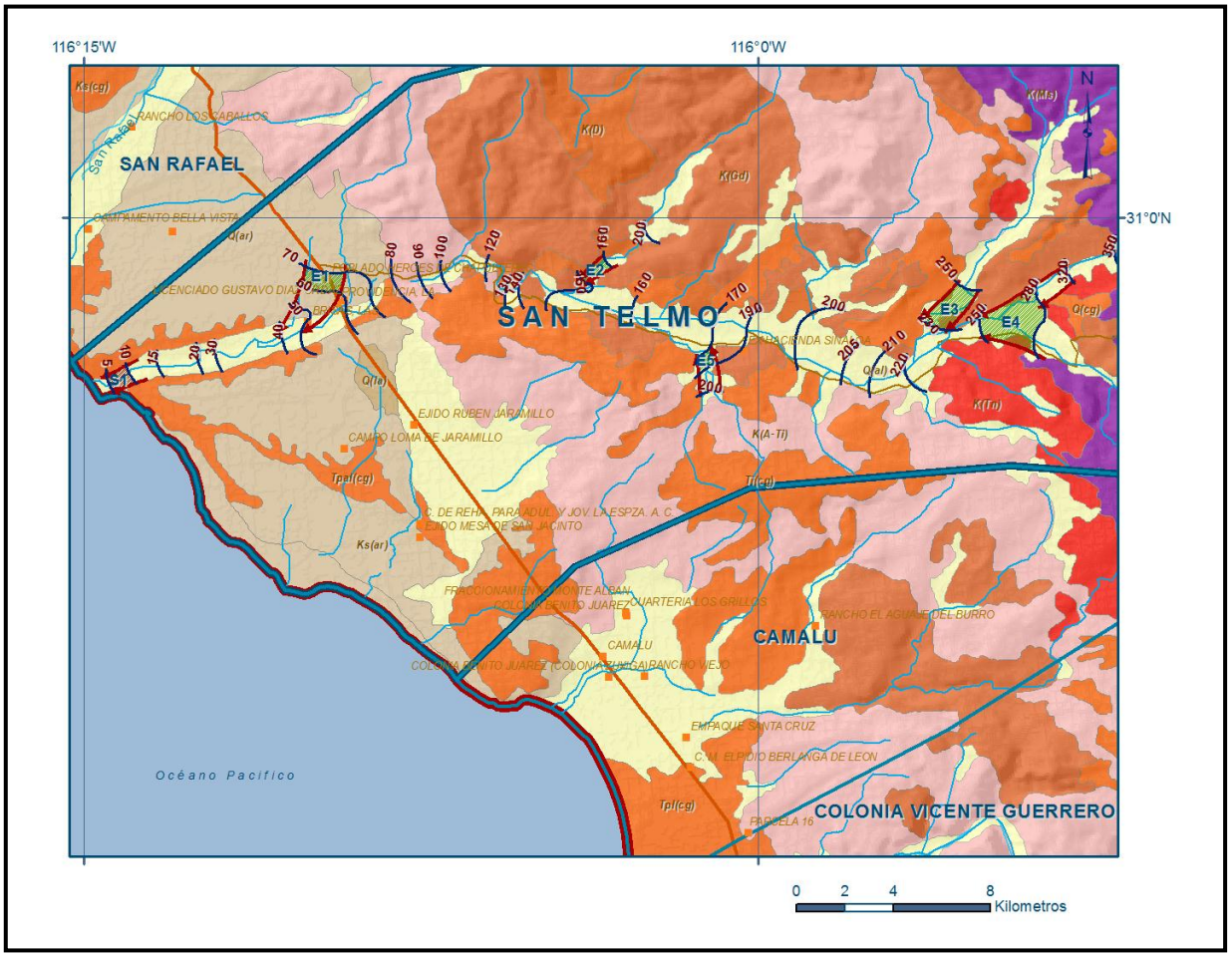


Figura 4. Elevación del nivel estático (msnm), 2010

5.2.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2001-2010, se observa que se registran abatimientos de 2 a 16 m, es decir un ritmo anual que varía de 0.2 a 1.8 m. los mayores abatimientos se presentan al oeste de Hacienda Sinaloa, donde se concentra la extracción para uso agrícola (figura 5). Se considera que el abatimiento promedio es de 0.5 m anuales.

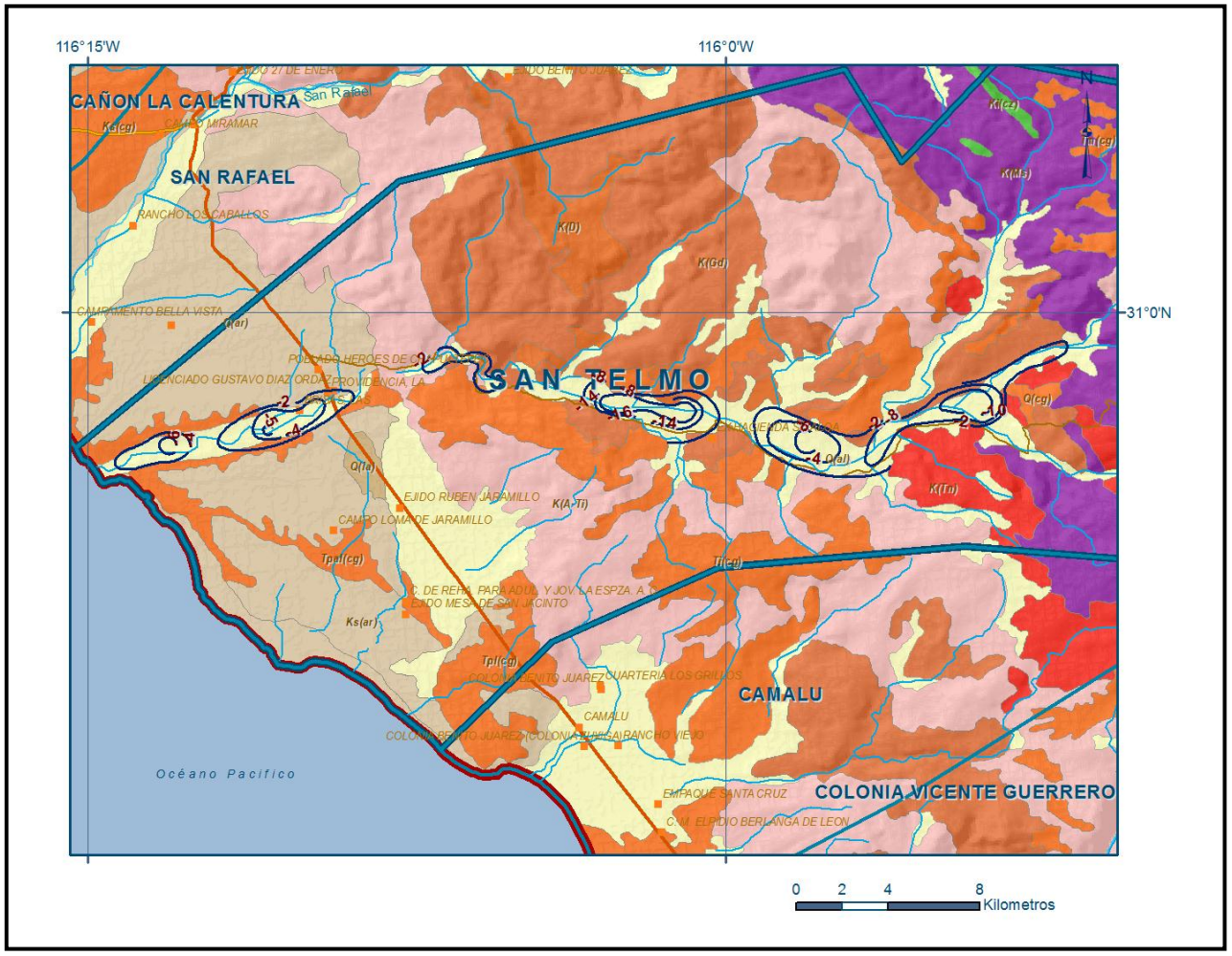


Figura 5. Evolución de la elevación del nivel estático (m) 2001-2010

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se recolectaron en total 10 muestras de aguas subterráneas en pozos representativos de la zona, 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, manganeso, arsénico, boro y litio entre otros.

En la zona alta y media del acuífero las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 350 a 3000 mg/l, solamente en la zona costera la salinidad alcanza valores superiores a 2,000 mg/l. De manera general, las

concentraciones de STD y demás constituyentes químicos disueltos se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles que establece la norma.

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 medio sodio intercambiable (S_1), lo que indica que son aptas para su uso en la agricultura sin restricciones en los cultivos y en el tipo de suelo.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron como principales familias del agua la bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica, que representan agua de reciente infiltración que circulado a través de rocas volcánicas con una evolución normal a lo largo de la dirección preferencial del flujo subterráneo. Sólo en la zona costera el agua es sódico-clorurada.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado por la Comisión Nacional del Agua en 2005, existen 723 aprovechamientos, de los cuales 450 son norias, 236 pozos y 37 tajos.

El volumen de extracción estimado es de **20.2 hm^3/año**, de los cuales el 16.3 hm^3 (80.7%) se destinan para uso agrícola, 1.8 hm^3 para uso doméstico (8.9%), 1.3 hm^3 (6.4%) para uso pecuario y 0.8 hm^3 (4.0%) para uso público urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para los años 2001-2010, en un área de 40 km^2 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:

Entradas (E) – Salidas (S) = 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:

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (Rt) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, que se considera como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), 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 (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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:

$$\mathbf{Eh + Rv + Ri – B - Sh – ETR = \pm \Delta V(S)} \qquad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
Ri: recarga inducida
B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR: Evapotranspiración
Δ**V(S):** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$\mathbf{Rv= B + Sh + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Ri} \qquad \mathbf{(2)}$$

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

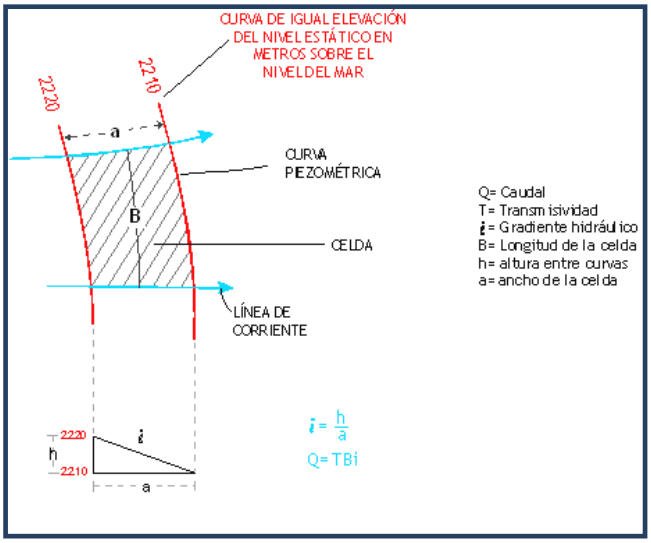
fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al 2010, mostrados en la figura 4. Con base en las configuraciones se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo
i: Gradiente hidráulico
T: Transmisividad en el canal de flujo



Con apoyo del monitoreo piezométrico y del análisis del mismo, se evidencia una entrada de agua al sistema a través de la porción Oriental de la zona.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **3.4 hm^3/año.**

Tabla 2. Estimación del volumen de entradas por flujo subterráneo 2010

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	1365	490	10	0.020408	0.0010	0.0279	0.9
E2	585	1365	10	0.007326	0.0010	0.0043	0.1
E3	975	1755	20	0.011396	0.0020	0.0222	0.7
E4	1270	2925	30	0.010256	0.0020	0.0261	0.8
E5	975	975	20	0.020513	0.0013	0.0260	0.8
						Total	**3.4**

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

7.1.3. Recarga inducida

Estudios en la zona desértica de Nevada indican que entre el 8 y el 16% del agua de retorno alcanza las zonas asociadas con el acuífero (Stonestrom et al., 2003). Por otro lado, en el acuífero vecino Guadalupe se ha estimado que aproximadamente el 12% del volumen del agua de riego retorna al acuífero mediante el proceso de percolación profunda.

De los 10 hm^3 anuales que se destinan al uso agrícola, al tomar en cuenta un coeficiente de infiltración de 12% en el volumen que se utiliza en la práctica de agricultura tradicional, resulta una recarga inducida de **1.0 hm^3/año.**

7.2. Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y evapotranspiración de niveles someros (ETR).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **10.5 hm^3 anuales**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración del elevación del nivel estático en 2010, mostrada en la figura 4. La celda de salida se localizó en la parte más baja del área de explotación, hacia la costa. El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 4. El valor de las salidas subterráneas es igual a 0.4 hm^3/año.

Tabla 3. Estimación del volumen de salidas por flujo subterráneo 2010

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
S1	1170	975	5	0.005128	0.002	0.0120	0.4
						Total	**0.4**

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

Esta componente está representada por la descarga de un acuífero a la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación que existe. Debido a que los valores de precipitación media anual son muy bajo, no se pueden aplicar los métodos empíricos Turc o el de Smith, ya que en ambos son válidos para precipitaciones mayores a 320 y 300 mm respectivamente.

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 vecinas (**1580 mm**). 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. De la figura 6 se deduce que para una profundidad al nivel estático de 3 m la evaporación es del 2%.

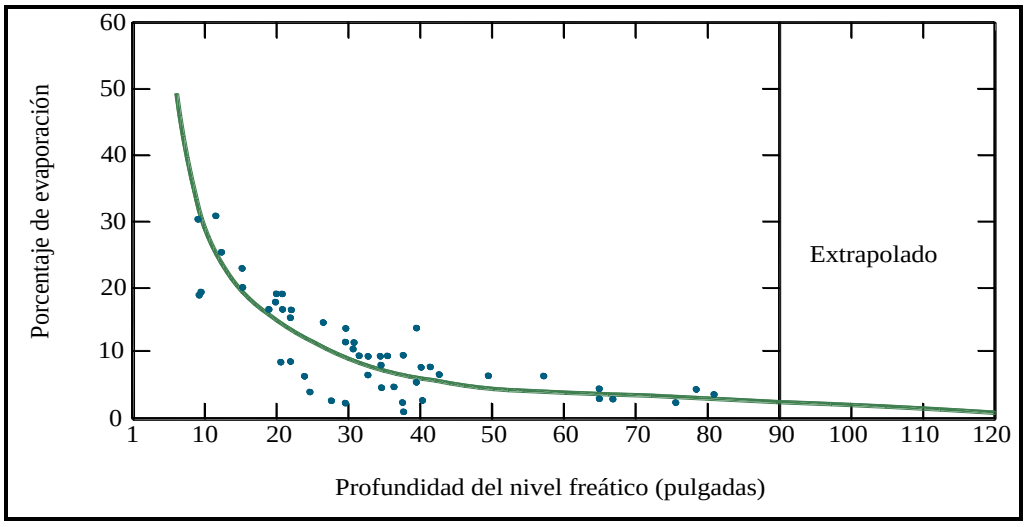


Figura 6. Evaporación del agua Subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático según White.

Considerando una superficie promedio de **6 km^2** de la porción costera del acuífero, donde la profundidad al nivel estático es menor a 3 m y un 2% de la evaporación potencial, la evaporación es de **0.2 hm^3 anuales.**

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km^2)	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm^3/año)
1.580	**6.0**	**0.02**	**0.2**

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cambio de almacenamiento se estimó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para periodo 2001-2010, mostrada en la figura 5. El cambio en el volumen almacenado, considerando un coeficiente almacenamiento (Sy) de 0.01 (ΔV), fue de -23.5 hm^3, que equivale a un promedio anual de **-2.6 hm^3/año**.

Evolución (m)	Abatimiento (m)	Area (km^2)	S	DV(S) (hm^3/a)
-16	-16	0.46	0.1	-0.7
-16 a -14	-15	2.00	0.1	-3.0
-10	-10	2.50	0.1	-2.5
-14 a -8	-11	0.97	0.1	-1.1
-10 a -8	-9	6.70	0.1	-6.0
-6	-6	0.46	0.1	-0.3
-5	-5	0.50	0.1	-0.3
-6 a -4	-5	5.56	0.1	-2.8
-5 a -4	-4.5	2.65	0.1	-1.2
-4 a -2	-3	13.50	0.1	-4.1
-8 a -2	-5	2.23	0.1	-1.1
-2	-2	2.50	0.1	-0.5
	Total	**40.0**	**Total**	**-23.5**
			Promedio anual	**-2.6**

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:

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

$$\mathbf{Rv = 10.5 + 0.4 + 0.2 - 2.6 - 3.4 - 1.0}$$

$$\mathbf{Rv = 4.1\ hm^3/año}$$

Por lo tanto:

Rt= Rv + Ri + Eh
Rt= 4.1 + 1.0 +3.4
Rt= 8.5 hm^3/año

7. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

DAS = Rt – DNCOM- VCAS (3)

Donde:
DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica
Rt = Recarga total media anual
DNCOM = Descarga natural comprometida
VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es **8.5 hm^3/año**.

8.2. Descarga Natural Comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. En este caso se considera que no existen descargas naturales comprometidas por lo tanto **DNCOM= 0.0 hm^3 anuales.**

8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS)

De acuerdo con la información existente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, el volumen concesionado de aguas subterráneas para este acuífero, a la fecha de corte al 31 de marzo de 2011, es de **25’900,524 m^3/año.**

8.4. Disponibilidad de aguas Subterráneas (DAS)

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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000; se obtiene de restar a la recarga total los volúmenes de la descarga natural comprometida y el volumen concesionado e inscrito en el REPDA.

Por lo tanto la disponibilidad de aguas subterráneas, de acuerdo a la expresión (3), es:

DAS = Rt – DNCOM - VCAS
DAS = 8.5 - 0.0 – 25.529829
DAS = -17.029829 hm^3 anuales

El resultado indica que actualmente no existe un volumen para otorgar nuevas concesiones; por el contrario su **déficit** es de **17’029,829 m^3 anuales**, que se están extrayendo del almacenamiento no renovable del acuífero.

La diferencia entre el bombeo y el volumen concesionado se debe a que el acuífero está sobre-concesionado en papel por causa del abandonado de pozos en las zonas costeras, sin que hayan sido objeto de caducidad sus derechos, y al uso de agua desalada.

9. BIBLIOGRAFÍA

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

Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Península de Baja California, 2010. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos San Vicente y San Telmo, en el estado de Baja California. Realizado por la Universidad Autónoma de Baja California.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1968. Balance Geohidrológico del Valle de San Telmo, en el Estado de Baja California. Realizado por INGESA.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1974. Estudio Geohidrológico en el Valle de San Telmo, en el Estado de Baja California. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería S.A. (TMI)

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1977. Estudio geohidrológico del Valle de San Rafael, Estado de Baja California Norte. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería (TMI)