CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tecate (0202), estado de Baja California

Ciudad de México, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 4
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1 Provincia fisiográfica 6
3.2 Clima 7
3.3 Hidrología superficial 8
3.4 Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 9
4.1 Estratigrafía 10
4.2 Geología estructural 15
4.3 Geología del subsuelo 16
5. HIDROGEOLOGÍA 16
5.1 Tipo de acuífero 16
5.2 Parámetros hidráulicos 17
5.3 Piezometría 17
5.4 Comportamiento hidráulico 18
5.4.1 Profundidad al nivel estático 18
5.4.2 Elevación del nivel estático 19
5.4.3 Evolución del nivel estático 19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 21
7.1 Entradas 22
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 22
7.2 Salidas 24
7.2.2 Bombeo (B) 24
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 24
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 24
8. DISPONIBILIDAD 25
8.1 Recarga total media anual (R) 26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 27
9. BIBLIOGRAFÍA 28

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Tecate, definido con la clave 0202 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Baja California, entre los paralelos 32° 26' y 32° 36' de latitud norte y los meridianos 116° 12' y 116° 56' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 751 km^2 (figura 1). Limita al norte con Estados Unidos de Norteamérica, al este con el acuífero La rumorosa-Tecate, al sur con Las Palmas y al oeste con el acuífero Tijuana. Geopolíticamente se ubica en el municipio Tecate y la porción oeste en el municipio Tijuana.

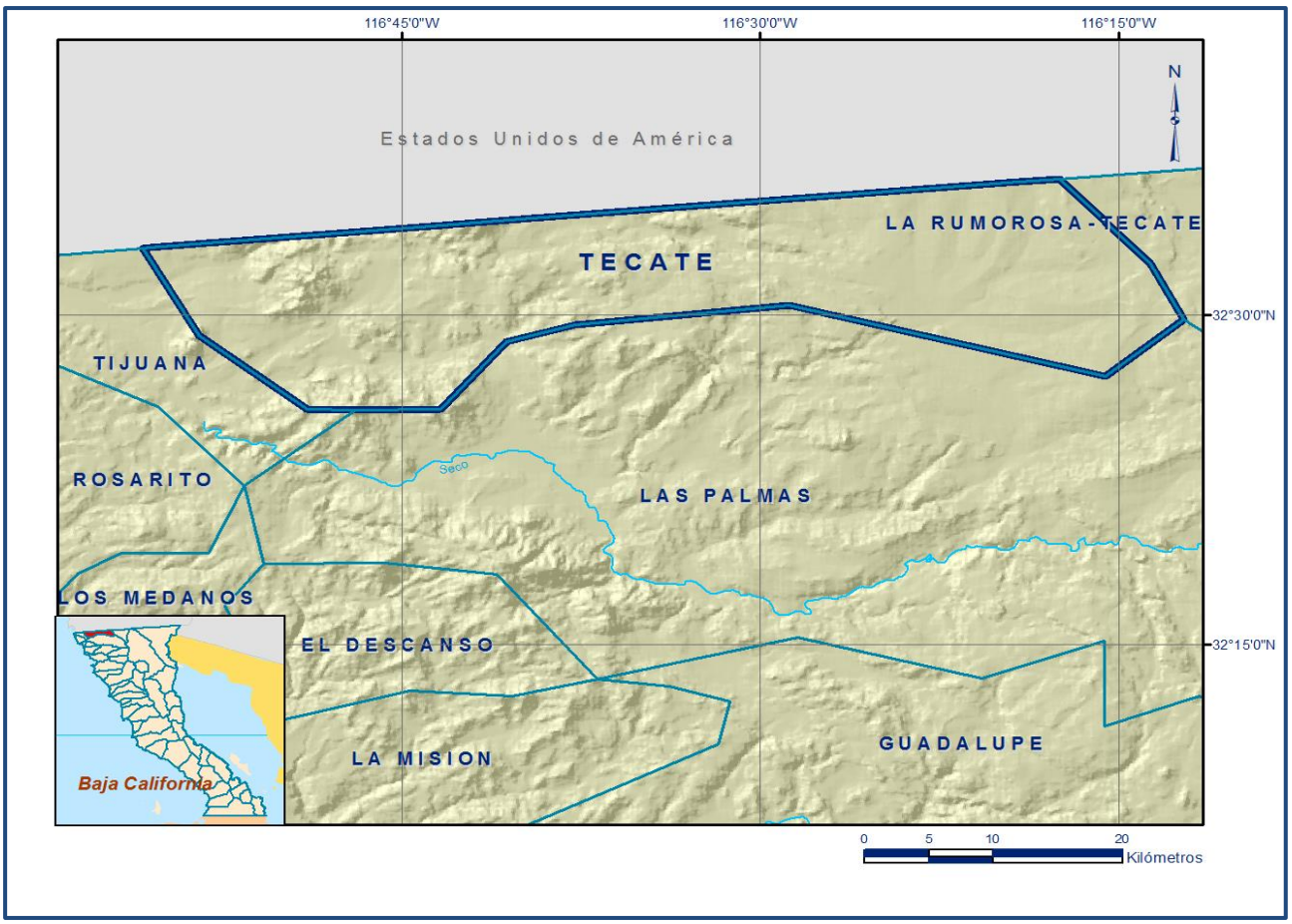


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 0202 TECATE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	13	38.6	32	32	19.8	
2	116	12	16.2	32	29	48.7	
3	116	15	32.8	32	27	12.4	
4	116	28	47.0	32	30	27.0	
5	116	37	45.1	32	29	34.6	
6	116	40	35.9	32	28	47.4	
7	116	43	22.4	32	25	43.3	
8	116	46	56.1	32	25	41.0	
9	116	48	57.2	32	25	42.0	
10	116	53	30.0	32	29	4.7	
11	116	55	51.1	32	33	2.6	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
12	116	17	27.5	32	36	13.0	
1	116	13	38.6	32	32	19.8	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tecate pertenece al Organismo de Cuenca I "Península de Baja California". El territorio del acuífero se encuentra completamente vedado y sujeto a las disposiciones del "*Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California*", publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965; esta veda se clasifica como tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

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

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos. A continuación, se mencionan los estudios más recientes e importantes:

INFORME GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL ARROYO TECATE, BAJA CALIFORNIA, elaborado por el Departamento de Hidrología Subterránea de Geohidrología y Zonas Áridas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1975. Se trata de un estudio preliminar que abarcó una superficie que colinda al norte con EUA, al este con la Sierra La Rumorosa, al poniente con la ciudad de Tijuana y al sur con el valle de Las Palmas.

El objetivo fue proporcionar un primer conocimiento del acuífero. Contiene un inventario de aprovechamientos del agua subterránea consistente en 23 pozos activos, de los cuales 13 son de la cervecería Cuauhtémoc y 10 para el abastecimiento del agua potable de Tecate. Así mismo reporta un levantamiento geológico, resultados de algunos análisis químicos e inclusive aspectos socioeconómicos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE TECATE, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. TÉCNICAS MODERNAS DE LA INGENIERÍA, S.A., elaborado por la

Subdirección de Geohidrología y Zona Áridas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1979. Este trabajo incluyó los aspectos climáticos, fisiográficos, condiciones geoquímicas en 19 pozos, configuración de profundidad, elevación y evolución del nivel estático; se realizaron 6 pruebas de bombeo y una estimación preliminar del balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DE LA ZONA TIJUANA-TECATE, BAJA CALIFORNIA, elaborado por Geofísica del Noreste GEA, S.A. de C.V. para la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1982. Está enfocado al estudio de los valles Ojos Negros-Real del Castillo y Guadalupe, al sur del Acuífero Tecate.

Incluye la descripción de la cuenca del río Guadalupe, una geología amplia y sus relaciones geohidrológicas, así como una prospección geofísica que permite conocer en forma limitada la geología del subsuelo. Además actualiza aspectos piezométricos, el modelo conceptual de los acuíferos en ambos valles y una propuesta de balance de las aguas subterráneas.

ESTUDIO DE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO EN DIFERENTES ACUÍFEROS DEL NORTE DE LA REPÚBLICA, DENTRO DE LOS CUALES, SE INCLUYEN LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DE MEXICALI-MESA ARENOSA, TIJUANA Y TECATE, elaborado por Estudios y Proyectos Moro, S.C para la Comisión Nacional del Agua, en el 2000. En el estudio, se menciona que el acuífero Tijuana está conformado por materiales granulares, producto de la denudación de rocas volcánicas y sedimentarias que delimitan el valle.

Así mismo reporta que debido a la limitada información piezométrica histórica, no fue posible definir de manera óptima el comportamiento de los niveles de las aguas subterráneas.

Establece una red de monitoreo con 16 nodos que cubren la totalidad del acuífero. La configuración de elevación del nivel estático muestra que las líneas de flujo convergen tanto al sureste como al noroeste; reporta un ritmo anual de abatimiento de 0.25 m para el periodo de 1979-1999.

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

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La superficie cubierta por el acuífero se encuentra ubicada en la Provincia Fisiográfica denominada Península de Baja California (Raisz, 1964). De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI (1977), el acuífero Tecate se encuentra ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Sierras de Baja California Norte.

La Península de Baja California es una faja larga y angosta de unos 1300 km de longitud y un ancho promedio de 100 km. Se une a la zona desértica de Sonora por el delta del Río Colorado, que forma una extensa llanura de inundación surcada por una red de canales que a veces se ensanchan formando lagunas, algunas de las cuales han sido abandonadas por las corrientes que las alimentaban y sólo reciben agua durante las grandes avenidas, tales como la Laguna Salada o Macuata.De acuerdo con la

clasificación de Manuel Álvarez Jr. (1961), el área está enclavada en la Provincia Fisiográfica Sierras de Baja California, Subprovincia de la Sierra Cristalina.

Se caracteriza por la presencia de sierras orientadas N-NW a S-SE y compuestas por monzonitas de cuarzo, dioritas, granitos y esquistos como los de las sierras de Juárez y San Pedro Mártir conocida como La Rumorosa, con elevaciones de hasta 1,700 msnm y 1,350 msnm, respectivamente.

La zona ocupada por el arroyo Tecate presenta en su mayor parte terreno con morfología de pequeños valles aluviales flanqueados por elevaciones de origen ígneo intrusivo y pequeños lomeríos de granito.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante es de tipo seco, mediterráneo, templado, con lluvias en invierno, porcentaje de precipitación invernal mayor de 36% y verano cálido (BSks). Hacia las zonas topográficamente más altas, el clima cambia a templado subhúmedo (Cs), también con lluvias en invierno.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones que tienen influencia en la superficie cubierta por el acuífero, La Puerta, Presa Rodríguez, Valle de Las Palmas, El Alamar, El Carrizo y El Florido, cuyo registro más amplio comprende un periodo de 55 años para el caso de la precipitación pluvial.

Con los datos de estas estaciones y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de 250.2 mm y 17.7° C. Por otra parte, el valor medio de la evaporación potencial es de xx mm anuales.

Los meses más lluviosos comprenden el periodo de noviembre a marzo en tanto que la temporada de estiaje se presenta de mayo a septiembre. La temperatura media anual varía de 13 a 23° C, los meses más cálidos corresponden al periodo comprendido entre julio y septiembre, con valores cercanos a los 25° C, en tanto que la temporada más fría se registra de noviembre a marzo, presentándose temperaturas hasta de 13° C en diciembre y enero.

3.3 Hidrología superficial

El acuífero, se encuentra ubicado en la Región Hidrológica No. 1 “Baja California Noroeste”, cuenca del Río Tijuana-Arroyo Maneadero.

La cuenca hidrológica del río Tijuana tiene una superficie de 4,371.4 km^2, de los cuales 3,209.6 km^2 están en territorio de México (73.4%) y 1,161.9 km^2 en EUA (26.6%); está integrada por 12 subcuencas, dos de ellas se ubican completamente en EUA y tres más son compartidas por ambos países (una de ellas es la denominada Tijuana, en la desembocadura del río del mismo nombre); el resto de las subcuencas están en territorio mexicano.

La zona de estudio se localiza en dos subcuencas; Río Las Palmas y Río Tijuana. La subcuenca denominada El Florido, es una zona de aportación que parte del cañón El Carrizo y que descarga en el cauce del río Tijuana, aguas abajo de la cortina de la Presa Abelardo L. Rodríguez. En su parte alta se encuentra la presa El Carrizo, que además de almacenar agua de su zona de aportación, almacena el agua proveniente del acueducto Río Colorado-Tijuana, que forma parte del sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Tijuana.

Por otra parte, la presa Abelardo L. Rodríguez que se localiza en la salida de la subcuenca de Las Palmas, es alimentada por el arroyo del mismo nombre, que como las demás corrientes superficiales es de régimen intermitente y se forma con las aportaciones de las cinco subcuencas que están aguas arriba de la subcuenca Las Palmas.Las obras de infraestructura hidráulica son la presa El Carrizo, así como el acueducto que conduce agua del río Colorado, desde Mexicali hasta la ciudad de Tijuana para abastecimiento público-urbano.

3.4 Geomorfología

Del análisis de las características topográficas de la región se puede observar que la mayor parte de la zona está constituida por los siguientes elementos geomorfológicos: meseta, lomeríos altos y planicies aluviales.

En la parte norte desde la Rumorosa hasta unos 15 km antes de Tecate, el paisaje es de lomeríos de pendientes suaves con algunos pequeños valles cubiertos por una delgada capa de aluvión. En el resto del área la pendiente es más abrupta, con arroyos que corren a lo largo de cañones, indicativo de la dureza de la roca que atraviesan y

sólo ocasionalmente se muestran algunos pequeños valles aislados donde el corte y el arrastre de los arroyos ha sido mayor.

La región se encuentra sumamente accidentada con una serie de barrancos alineados en sentido noreste-suroeste que desembocan hacia la costa. Los barrancos son valles montañosos, profundos y estrechos, equivalentes a cañones o valles en forma de "V", con pendientes verticales empinadas. Esta unidad geomorfológica es típica de las mesas formadas por erosión de las capas horizontales de rocas sedimentarias o volcánicas, que son frecuentemente formas de relieve producidas por erosión.

4. GEOLOGÍA

La característica geológica del acuífero consiste en basaltos horizontales y tobas, miembros de la Costa Azul, pertenecientes a la Formación Rosarito Beach del Mioceno. Estas rocas están cubiertas a elevaciones de 60 a 100 m por una delgada capa de arenisca y conglomerados de la Formación San Diego (Plioceno). Los mismos basaltos y tobas de brecha que se encuentran en la parte inferior de los farallones frente al mar, a una elevación de entre 90 y 170 m, están expuestos en la zona. También afloran rocas sedimentarias de origen marino de edad Cretácico Superior, pertenecientes a la Formación Rosarito. Hacia la zona costera, formada por amplias mesas y colinas, se encuentran basaltos y andesitas de edad miocénica (figura 2).

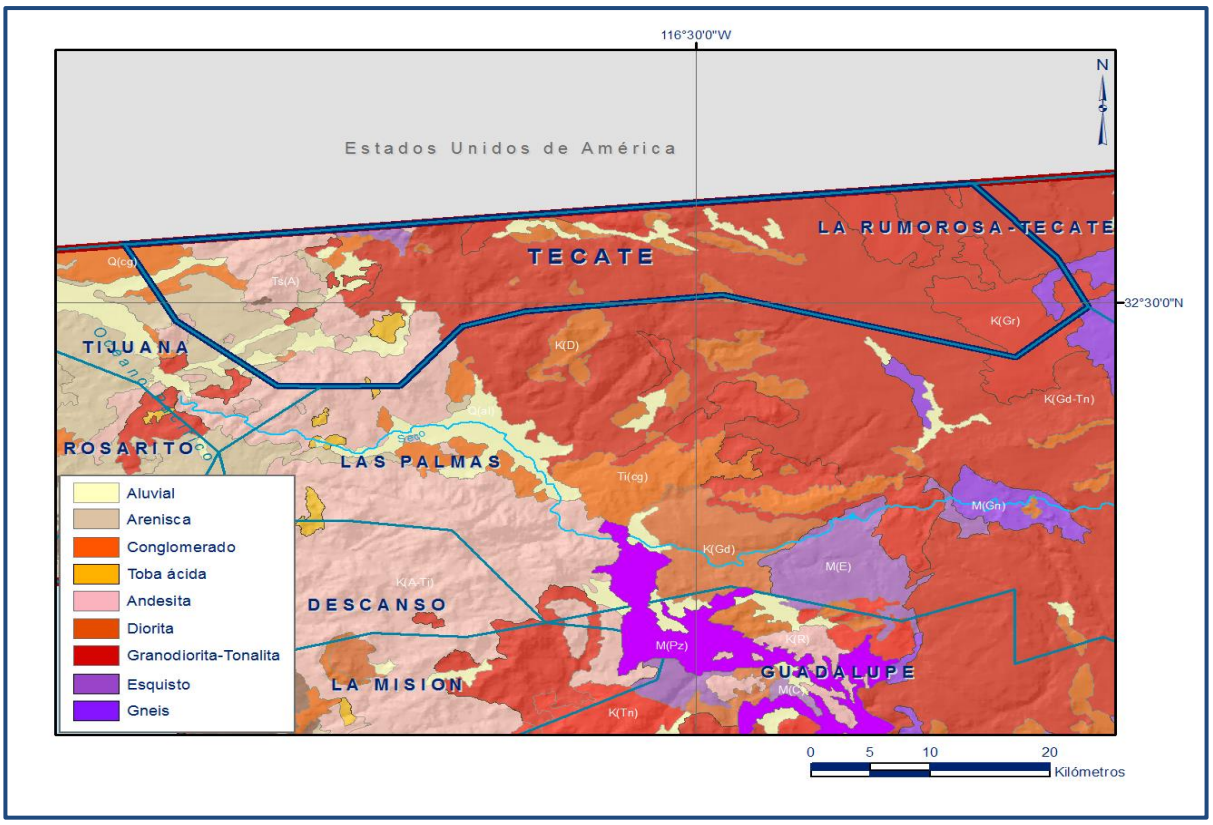


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En el acuífero aflora una variedad de rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo rango estratigráfico varía del Cretácico al Reciente.

En la porción central y oriental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. La secuencia de rocas expuestas en la región se menciona a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente.

Formación Alisitos. Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980).

Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. Esta formación se encuentra deformada y parcialmente metamorfizada, está afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de numerosos cuerpos graníticos del Cretácico. Se encuentra subyaciendo en forma discordante a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. De acuerdo con Rangin (1978) en INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental.

Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste.

Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas. En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica.

La permeabilidad de esta unidad varía de moderada a muy baja y está relacionada con su grado de fracturamiento, la continuidad de estas estructuras, así como su abertura. Cuando el fracturamiento es escaso, constituyen el basamento hidrogeológico del acuífero. Aflora al oriente de la ciudad de Tijuana, en el cerro Colorado y en las sierras alargadas en sentido noroeste-sureste, con elevaciones entre 500 y 700 msnm; así como al sur en la sierra La Presa, donde los cerros tienen elevaciones de 400 a 500 msnm.

Rocas ígneas Intrusivas. Conforman el Batolito Peninsular cuyas rocas plutónicas varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro.

Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación

Alisitos. Se relacionan con la evolución de un arco volcánico-plutónico (intrusivo) que estuvo activo durante el Jurásico-Cretácico.

Este batolito en la zona está representado por rocas graníticas y granodioríticas que intrusionan, alteran y deforman a la Formación Alisitos. En ocasiones presentan ligero fracturamiento, formando bloques grandes aislados, cuando el fracturamiento es mayor forman lajas. Debido a que generalmente presenta baja permeabilidad, sólo es capaz de almacenar agua en su porción superior alterada.

Formación Rosario (Kr). Formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino.

Esta formación se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos pre-terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea “Santillán-Barrera” que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar.

Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior (lower sandstone member, LSS), (b) miembro lodolítico medio (middle mudstone member, MM) y (c) miembro conglomerático-arenoso superior (upper sandstone-conglomerate member, USS). Los tres miembros presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico).

La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar. En términos geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerda con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío.

Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas, y subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario.

Las determinaciones paleontológicas ubican estratigráficamente a la Formación Rosario en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Se ha calculado que su espesor máximo es de 750 m.

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

Los afloramientos actuales de rocas de la Cuenca Rosarito Beach se encuentran limitados al este por los terrenos batolíticos y pre-batolíticos de las serranías peninsulares y hacia el oeste por la actual línea de costa. La margen occidental puede extenderse para incluir a la Islas Los Coronados, cerca de Tijuana y a las Islas Todos Santos, cercanas a Ensenada.

El límite norte se extiende hacia la porción sur del Condado de San Diego, California, en donde se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos plio-pleistocénicos marinos y gravas fluviales. Los afloramientos meridionales se presentan en Punta San Miguel y al suroeste en las Islas Todos Santos.

De manera general, está constituida por intercalaciones de basaltos, tobas y brechas que afloran en las subcuencas Rosarito y Tijuana.

De la base a la cima, los cincos miembros de la subcuenca Tijuana corresponden a depósitos sedimentarios y volcánicos.

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

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

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

Formación San Diego. Minch (1967) la divide en dos miembros, el superior y el inferior, con espesores aproximados de 61 y 30 m respectivamente; Kennedy y Tan (1977) y Gunther (1964), describen también dos miembros. Su edad varía del Terciario Superior al Cuaternario (Plioceno Medio a Tardío-Pleistoceno Inferior).

En general al miembro inferior le atribuyen un origen marino y presenta granulometría fina en la que predominan las arenas de grano fino; en tanto que el miembro superior es principalmente continental; y de granulometría gruesa formada por arenas de grano grueso, alternadas con gravas.

Ninguno de estos investigadores describe o incluye horizontes arcillosos en la formación y es Woodward y Cliyde (1983) quienes por primera vez incluyen en su descripción del corte litológico del pozo National City No. 3, secciones de espesor importante de arenas arcillosas y limos arcillosos (Huntley et. al, 1996).

Conglomerados Cuaternarios. De tipo polimíctico de fragmentos mal clasificados, subangulosos y subredondeados, gravillentos, con escasa matriz areno-arcillosa. Presentan consolidación media y fracturamiento incipiente. Estos depósitos son abanicos aluviales acumulados en un ambiente netamente continental. Su porosidad se considera media.

Depósitos aluviales. Este término incluye a todos los materiales recientes depositados en los cauces de arroyos y zonas topográficamente bajas, constituidos por fragmentos de todo tipo de rocas preexistentes.

Están conformados por sedimentos aluviales que se depositaron a lo largo los ríos Tijuana, en la porción central, Alamar al este y Florido al sureste; los de mayor importancia por su espesor son los de los ríos Tijuana y Alamar. Estos materiales

constituyen el acuífero que se explota actualmente. Con frecuencia se pueden confundir con los sedimentos de la Formación San Diego.

4.2 Geología estructural

Existen una gran cantidad de estructuras geológicas, principalmente fallas y fracturas, debido a que la zona es tectónicamente inestable y activa. La región se caracteriza por una gran diversidad de estructuras geológicas entre las cuales pueden mencionarse las fallas normales, las fracturas de diferentes dimensiones, así como aparatos y derrames volcánicos y grandes cuerpos intrusivos.

En términos generales, la Formación Rosarito Beach en sus facies sedimentaria y vulcanosedimentaria está fragmentada en bloques, uno de ellos se localiza al sur y suroeste en la margen izquierda del río Tijuana.

Otro al este, entre la margen izquierda del río Alamar y la margen derecha del río Tijuana y otro más al norte, entre las márgenes derecha de los ríos Alamar y Tijuana, en la zona denominada como Mesa de Otay, donde está en gran parte cubierta por la Formación San Diego.

Estos bloques están delimitados por estructuras geológicas regionales, alrededor de las cuales existe una gran cantidad de epicentros también alineados, lo que corrobora la presencia de discontinuidades activas de la corteza terrestre, en las que hay rompimiento de rocas; esta situación se comprueba además con la existencia de zonas termales como la conocida con el nombre de Agua Caliente.

Esta separación en bloques tiene repercusiones desde el punto de vista hidrogeológico, porque influye de manera directa en la falta de continuidad de los sistemas acuíferos. La presencia de fallas normales originó la formación de fosas tectónicas en las que se acumularon depósitos aluviales, coluviales y la Formación San Diego.

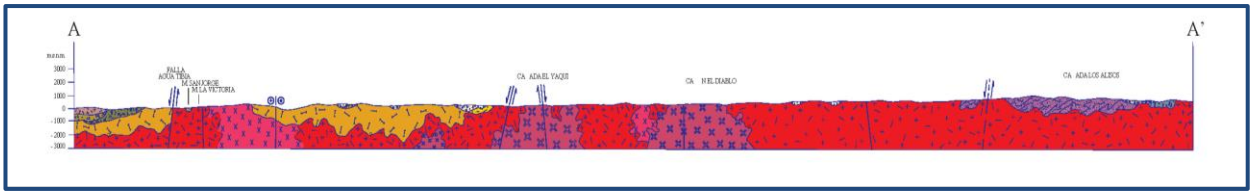
Finalmente, las fracturas de enfriamiento de las coladas de lava y las generadas por procesos tectónicos, permiten la infiltración de agua a través de rocas volcánicas y la recarga de la Formación Rosarito Beach.

4.3 Geología del subsuelo

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

Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos) cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias.

El espesor de los depósitos clásticos es de 20 a 80 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.



Fuente: Carta Geológico-Minera, Mexicali I11-11. Escala: 1:250 000

Figura 3. Sección geológica

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Con los resultados de la geología del subsuelo, la hidrología superficial y de las pruebas de bombeo, entre otros, fue posible definir un sistema acuífero de tipo libre heterogéneo y anisótropo, en el que el movimiento del agua subterránea se lleva a cabo en un medio granular y otro fracturado.

El medio granular está constituido por depósitos clásticos de origen aluvial y coluvial de granulometría variada, así como conglomerados que se alojan en el cauce de ríos y arroyos y en cuencas tectónicas.

El medio fracturado está conformado por rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. La unidad impermeable la forman las rocas graníticas del alto macizo rocoso.

La alta densidad de drenaje que exhiben estas rocas indica su casi nula capacidad de infiltración; sin embargo, los numerosos cauces angostos propician, a través de un drenaje dendrítico, importantes volúmenes de escurrimiento que terminan en las partes bajas, donde en los cauces de los arroyos y ríos circula y almacena la lluvia proveniente de las partes altas; esta unidad impermeable ocupa aproximadamente el 90% del área administrativa del acuífero.

Las andesitas y basaltos, por su baja permeabilidad, constituyen fronteras al flujo subterráneo.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero se analizó la información de estudios previos y se interpretaron 6 pruebas de bombeo realizadas en esos estudios.

De su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los valores de transmisividad varían de 6.40×10^{-4} a 2.44×10^{-2} m^2/s; en tanto que la conductividad hidráulica oscila entre 9.49×10^{-6} y 9.44×10^{-3} m/s (0.82 a 81.6 m/d).

Los valores más bajos corresponden a los sedimentos arcillosos aluviales y a la Formación Rosarito Beach; los más altos a los depósitos clásticos aluviales de granulometría gruesa. El coeficiente de almacenamiento estimado es de 0.1.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea y con fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2000-2013, en el acuífero alojado en depósitos aluviales del río Tecate.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 varía de 10 a 25 m. La mayor parte de los aprovechamientos se localiza en la parte central del acuífero, en la zona urbana del valle, los valores de mayor profundidad que van de 10 a 15 m se encuentran en la porción oriental del acuífero (figura 4), cerca de la zona urbana Ejido Chilpancingo y los valores más someros se encuentran hacia las márgenes del río Tecate.

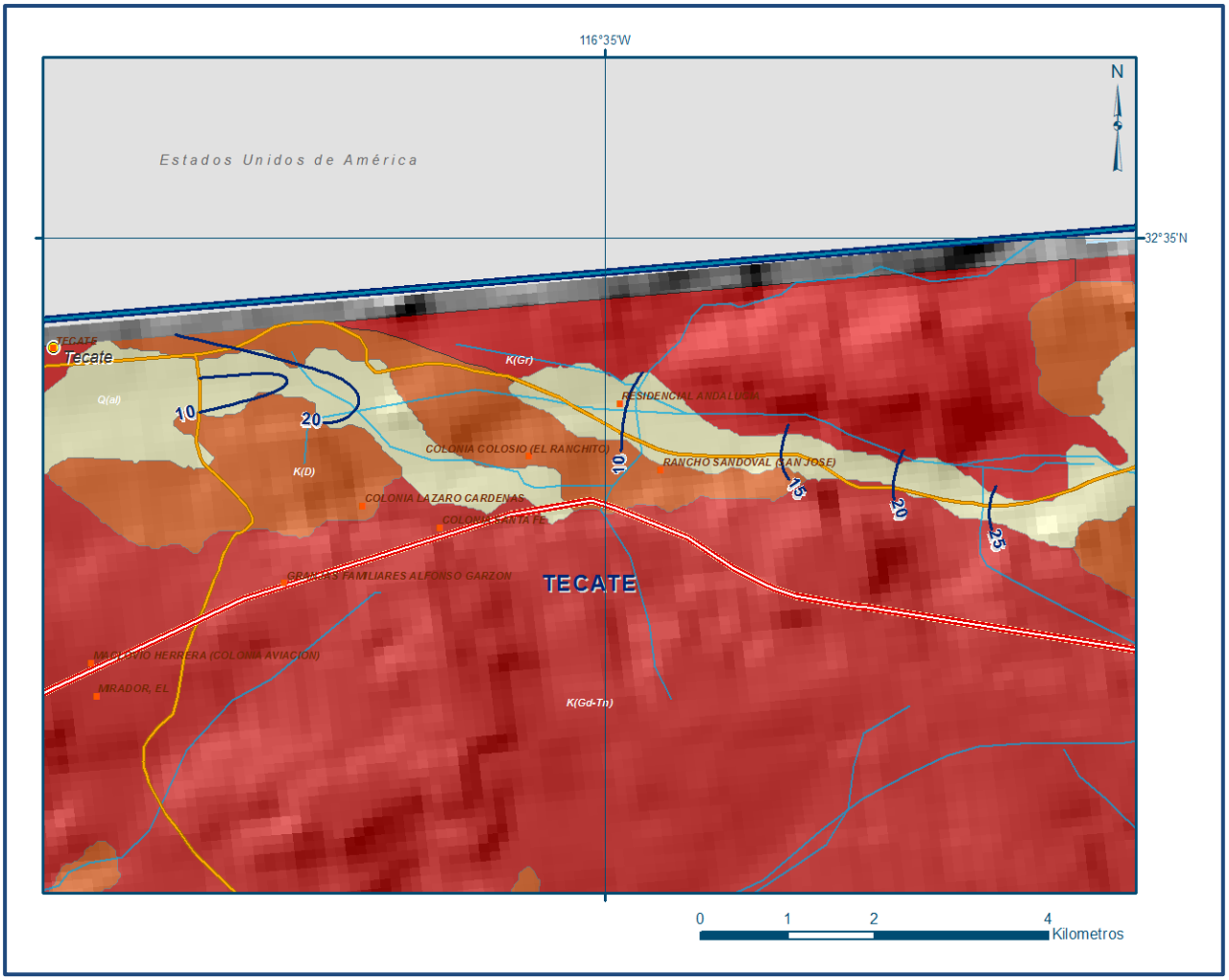


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En 2013, los valores de elevaciones del nivel estático muestran el efecto de la topografía, varían de 595 a 505 msnm, los valores aumentan conforme se asciende topográficamente. La dirección del flujo subterráneo es paralela al escurrimiento del río Tecate.

En la zona del valle, muestra una trayectoria este-oeste (figura 5).

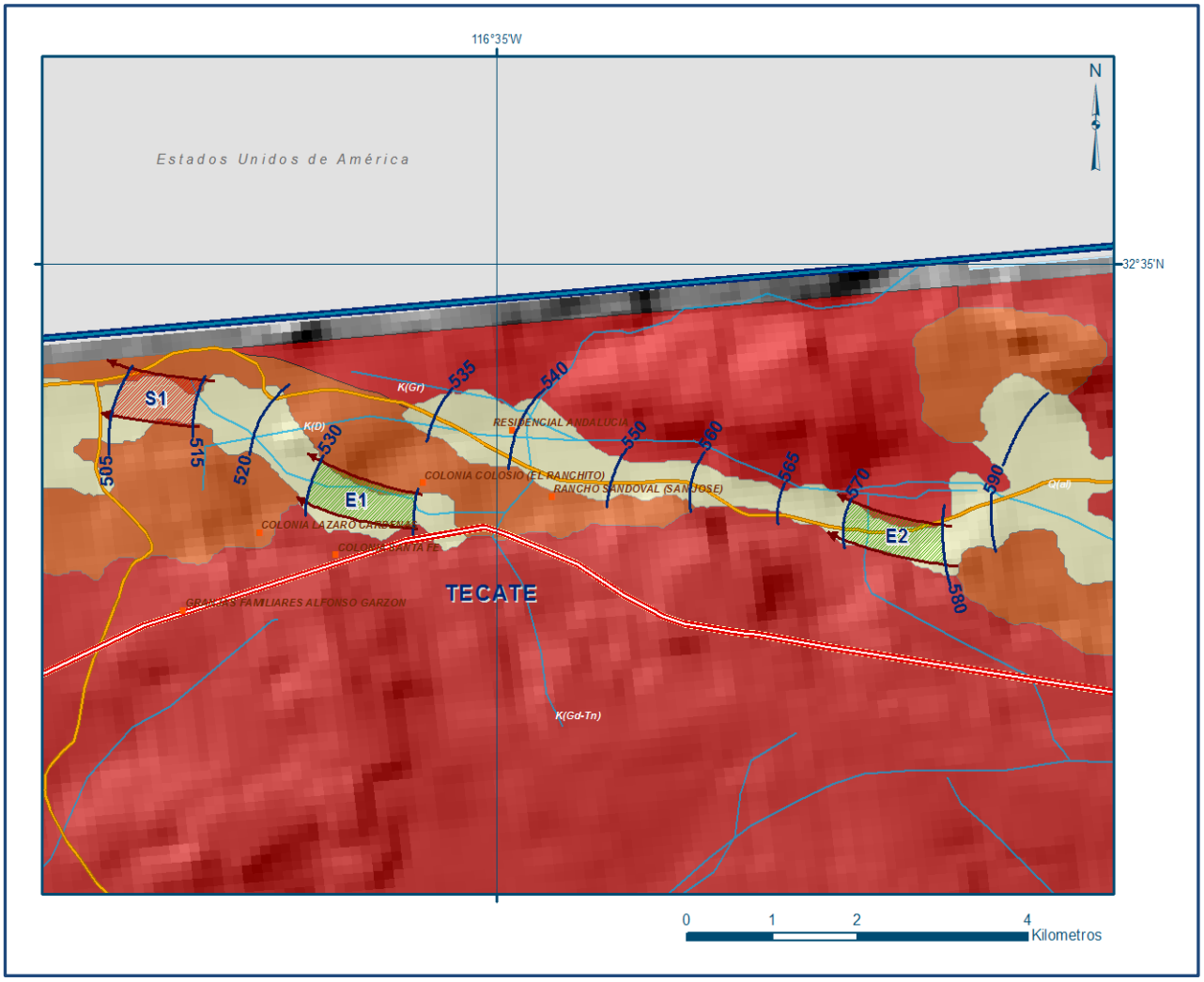


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2000-2013, los valores de abatimiento varían de -5 a -15 metros, los valores de mayor abatimiento se encuentran

en la región norte del acuífero, los de menor abatimiento en las márgenes del río Tecate (figura 8).

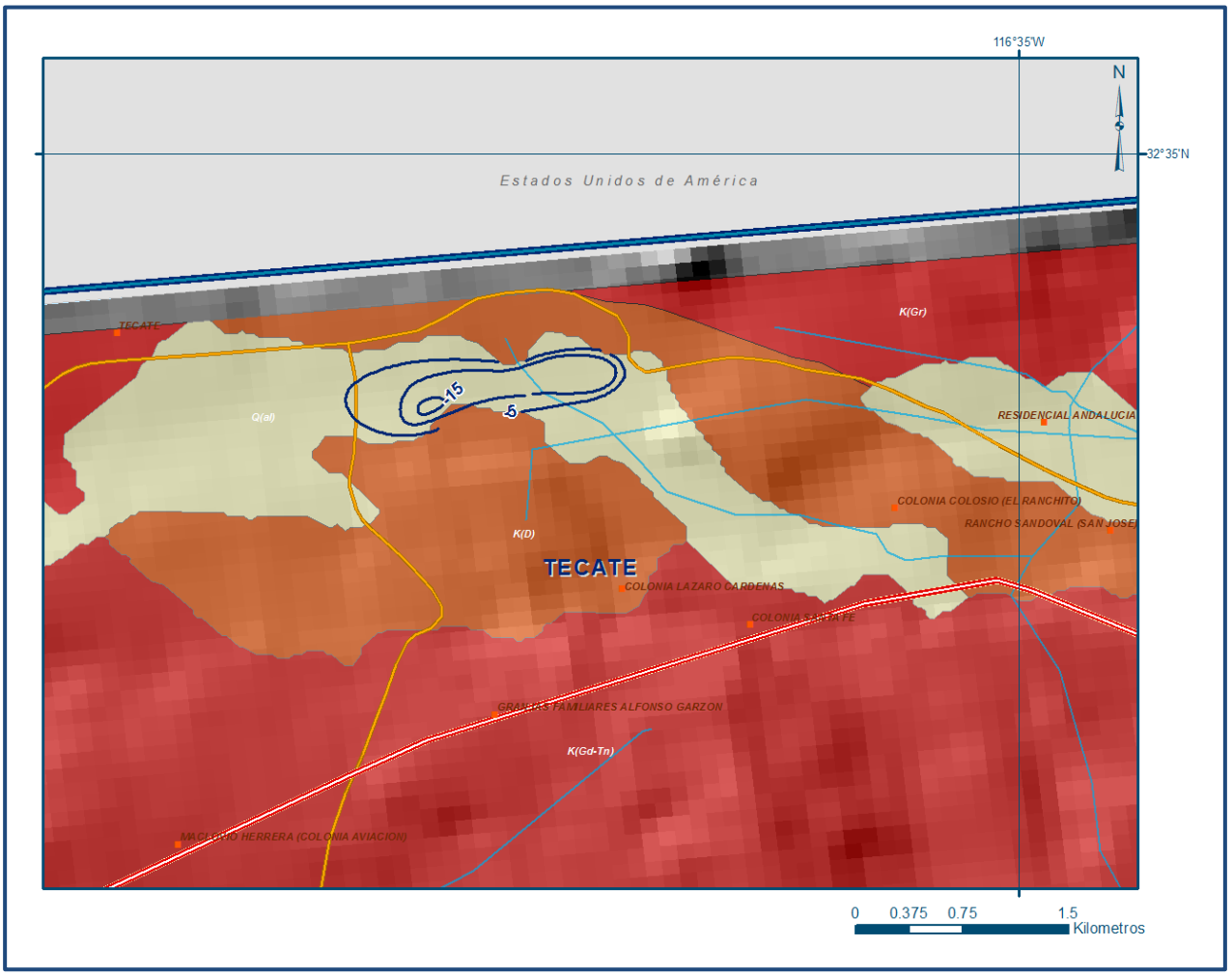


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

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

Con respecto a las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) son de 300 a 900 ppm.

Los valores más bajos se registran hacia las regiones topográficamente más altas y en los sedimentos residuales; los más altos se presentan en los sedimentos aluviales que conforman el cauce del río Tecate.

En cuanto a las familias del agua, predomina la clorurada-sódica, clorurada-sódico-cálcica y bicarbonatada, por lo que se recomienda que su empleo sea restringido a cultivos tolerantes a las sales y en suelos con drenaje adecuado.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con información del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) en el 2013, se registró la existencia de 447 aprovechamientos del agua subterránea que en conjunto extraen un volumen de **12.1 hm^3**, de los cuales 4.4 hm^3 (36.4%) son para uso agrícola, 4.3 hm^3 (35.4%) para uso público urbano, 2.2 hm^3 (17.9%) para uso industrial y el resto 1.2 hm^3 (10.3%) para los otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2000 a 2013, en una superficie de 110 km^2, que corresponde a la porción del acuífero donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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 de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv), la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo horizontal (Eh).

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

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
B: Bombeo
ΔV(S): Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte

de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

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

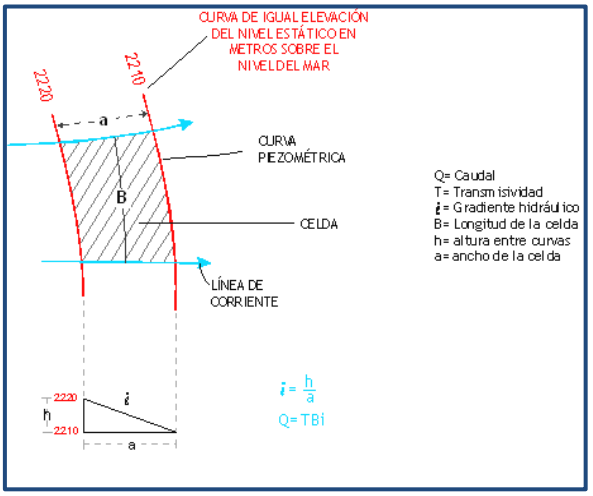
Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)
T = Transmisividad (m^2/s)
B = Longitud de la celda (m)
i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **5.2 hm³/año**.

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en 2013 y otros previos, adaptados al espesor saturado.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (2013)

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	600	1000	10	0.01000	0.0150	0.0900	2.8
E2	550	1100	10	0.00909	0.0150	0.0750	2.4
						Total entradas	5.2

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **12.1 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el 2013. El valor obtenido es de **2.2 hm³** anuales (tabla 3).

Tabla 3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (2013)

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	600	850	10	0.01176	0.0100	0.0706	2.2
						Total entradas	**2.2**

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2000-2013 (figura 6).

Con base en esa evolución y considerando un valor promedio del coeficiente de almacenamiento (Sy) de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

Sy: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -2.6 hm^3, por lo que el promedio anual es de **-0.2 hm^3**.

Tabla 3. Evolución promedio anual (2000-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-15	-15	0.0	0.1	0.0
-10 a -15	-12.5	0.3	0.1	-0.4
-5 a -10	-7.5	0.3	0.1	-0.2
0 a -5	-2.5	8.0	0.1	-2.0
Área de balance		**8.6**		-2.6
		Promedio anual		**-0.2**

Solución de la ecuación de balance

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

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

Sustituyendo valores:

$$\mathbf{Rv = 2.2 + 12.1 - 0.2 - 5.2}$$

$$\mathbf{Rv = 8.9\ hm^3}$$

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

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$

$$R = 8.9 + 5.2$$

$$\mathbf{R = 14.1\ hm^3/año}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	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 **14.1 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. 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 **12,764,855 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.

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$
$$\mathbf{DMA = 14.1 - 0.0 - 12.764855}$$
$$\mathbf{DMA = 1.335145\ hm^3/año.}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,335,145 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1975. Informe geohidrológico de la cuenca del arroyo Tecate, Baja California, elaborado por el Departamento de Hidrología Subterránea de Geohidrología y Zonas Áridas (SARH).

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1979. Estudio geohidrológico del Valle de Tecate, en el estado de Baja California., elaborado por Técnicas Modernas de la Ingeniería, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1982. Estudio geohidrológico cuantitativo de la zona Tijuana-Tecate, Baja California, elaborado por Geofísica del Noreste GEA, S.A. de C.V.