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 La Rumorosa-Tecate (0236), 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							
0236	LA RUMOROSA-TECATE	1.7	0.0	0.712026	0.9	0.987974	0.000000

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 0236 LA RUMOROSA-TECATE, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

México, D.F., Diciembre 2008

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 6
3.3 Hidrografía 7
3.4 Geomorfología 7
4. GEOLOGÍA 7
4.1 Estratigrafía 8
4.2 Geología estructural 9
4.3 Geología del subsuelo 10
5. HIDROGEOLOGÍA 10
5.1 Tipo de acuífero 10
5.2 Parámetros hidráulicos 10
5.3 Piezometría 10
5.4 Comportamiento hidráulico 10
5.4.1 Profundidad al nivel estático 10
5.4.2 Elevación del nivel estático 12
5.4.3 Evolución del nivel estático 14
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) 17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 17
7.2 Salidas 18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR) 18
7.2.2 Bombeo (B) 20
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 20
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 concesionado de agua subterránea (VCAS) 22
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 La Rumorosa-Tecate, definido con la clave 0236 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza geográficamente en la porción norte del estado de Baja California, entre los paralelos 32°16’00’’ y 32°39’00’’ de latitud Norte y los meridianos 115°54’00’’ y 116°07’00’’ de longitud Oeste, cubriendo una superficie de 739 km^2; sin embargo, el área de explotación del acuífero se reduce a 70 km^2.

Colinda al noroeste con el acuífero Tecate, al este con el acuífero Laguna Salada y al suroeste con el acuífero Las Palmas (figura 1).

Geopolíticamente se ubica dentro del municipio de Tecate, B. C., las principales poblaciones dentro del acuífero son: La Rumorosa, Ejido Jacume; y las pequeñas localidades de El Cóndor, Japa, Buenavista, Agua Hechicera y Oro Blanco.

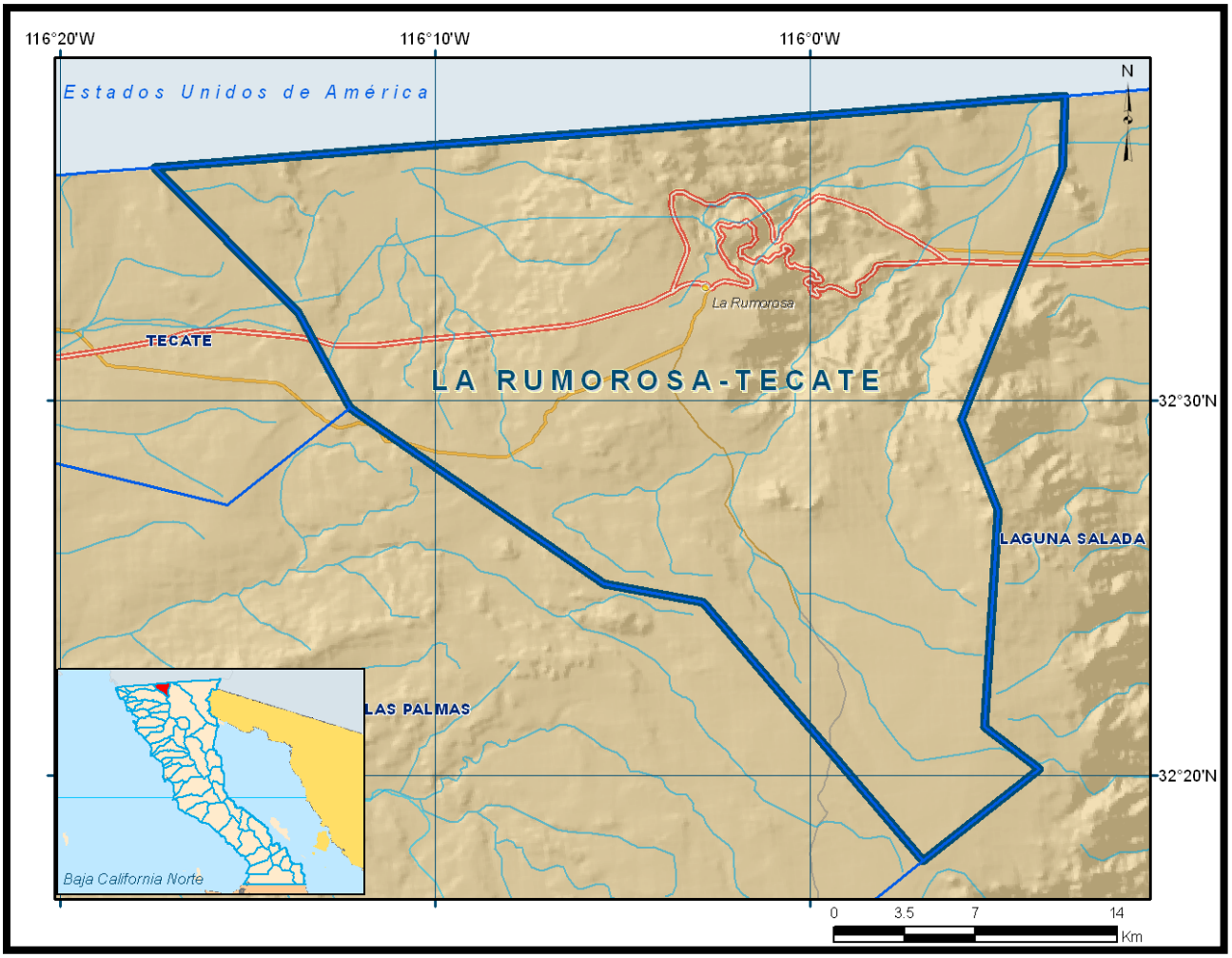


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0236 LA RUMOROSA-TECATE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	53	17.1	32	36	12.9	
2	115	55	57.8	32	29	28.8	
3	115	54	59.4	32	27	3.8	
4	115	55	21.7	32	21	18.6	
5	115	53	53.3	32	20	10.3	
6	115	56	59.5	32	17	43.7	
7	116	2	51.6	32	24	37.5	
8	116	5	30.0	32	25	6.8	
9	116	12	16.2	32	29	48.7	
10	116	13	38.6	32	32	19.8	
11	116	17	27.5	32	36	13.0	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
12	115	53	12.6	32	38	7.3	
1	115	53	17.1	32	36	12.9	

1.2 Situación administrativa del acuífero

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

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2008, el municipio de Tecate se clasifica como zona de disponibilidad 3. A la fecha no se ha constituido un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca (2) Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999, su porción este se ubica en la Comisión de Cuenca Río Colorado.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.

En el territorio que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DE LA CUENCA TIJUANA- TECATE, elaborado por GENESA, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Aprovechamientos Hidráulicos, en 1982. El censo de aprovechamientos reveló la existencia de 16 norias, 5 pozos y 1 manantial. Tres norias se localizaban en el poblado Buena Vista, 2 en Picacho y el resto en la zona cercana al Ejido Jacume, donde también se localizaron los 5 pozos y el manantial.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA EL POBLADO LA RUMOROSA MUNICIPIO DE TECATE, BAJA CALIFORNIA, elaborado para el Gobierno del Estado de Baja California, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, en1990. El objetivo del estudio fue definir la fuente de abastecimiento idónea y evaluar las posibilidades de factibilidad técnica y económica para el aprovechamiento del acuífero en beneficio de la población La Rumorosa.

El estudio indica que la cuenca hidrológica donde se localiza el poblado La Rumorosa, pertenece al arroyo Agua Grande, ubicada al norte del estado, señalan una superficie de 522 km^2 con paisaje de zona montañosa característico de la Sierra de Juárez, que limita al oriente valles estrechos. Esta última porción se ubica en la región de la Laguna Salada y se interna en los Estados Unidos de América como el Arroyo Pinto Wash. El régimen de lluvia es invernal con una precipitación media anual de 200 mm aproximadamente que aporta un volumen de 120.5 hm^3 al año en total de la cuenca. La temperatura media anual es de 15° C.

Se localizaron tres aprovechamientos en la zona, dos norias y un pozo con una concentración de STD que rebasa la norma, la calidad del agua del arroyo está dentro de la norma. El volumen de la extracción se estimó en 1.8 hm^3 anuales, de los cuales 158,000 m^3 escurren superficialmente por el arroyo Agua Grande hacia el Cañón de Llanos. Los niveles estáticos variaban de 4 a 5 metros en las norias y hasta 14 metros en el pozo.

Las conclusiones indican que la principal fuente de abastecimiento es el agua subterránea, la recarga del acuífero se debe básicamente a los escurrimientos superficiales que se almacenan en los aluviones de buena permeabilidad. La calidad del agua varía de buena a regular, con valores de concentración de STD que varían de 720 a 1,236 ppm. Se estimó una recarga de 5.8 hm^3 en un área de 482 km^2.

ESTUDIO GEOELÉCTRICO EN EL VALLE DE PICACHOS, MUNICIPIO DE TECATE, B. C., elaborado para el Gobierno del Estado de Baja California, Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate, en 2007. El estudio se refiere a las particularidades geoeléctricas llevadas a cabo mediante la ejecución de 4 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en el Valle de Picachos, Municipio de Tecate, B. C., los cuales se localizaron al sur de la carretera federal que comunica las ciudades de Tijuana y Mexicali, en las inmediaciones del poblado La Rumorosa, con el propósito de construir un barreno exploratorio para el aprovechamiento del acuífero. Se enfocó a definir la distribución geoeléctrica del subsuelo y determinar la presencia de algún sector o unidad electroestratigráfica favorable.

Concluye que la secuencia electroestratigráfica generalizada, de acuerdo con el modelo, está compuesta por tres paquetes El primero es la cubierta superficial de alta resistividad 1460-4199 Ohm/m y profundidades menores de 8 m asociado a suelos residuales, arenas-gravas, que son materiales granulares de buena permeabilidad que cubren el área estudiada. Continúa un paquete de resistividades relativamente bajas 29-86 ohm/m, con espesores entre 16 y 64 m, interpretado como sedimentos, gravas, arenas con cierto grado de arcillocidad, producto de la desintegración de rocas graníticas, la que constituye el horizonte objetivo para la evaluación del acuífero. Finalmente los dos paquetes señalados descansan sobre una capa de muy alta resistividad, correlacionable con las rocas graníticas básales consideradas impermeables.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se encuentra se encuentra contenido en la provincia fisiográfica denominada Península de Baja California, subprovincia de las Sierras de Baja California Norte (según INEGI, 1997). Esta subprovincia se caracteriza por estar conformada por rocas batolíticas graníticas, metamórficas y sedimentarias con un rango de edad que varía del Mesozoico al Reciente.

Según Manuel Álvarez Jr., el acuífero queda ubicado en la porción noroccidental del estado y pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Cristalina; morfológicamente el área presenta formas de fuerte relieve, debido a las estructuras geológicas transversales al macizo peninsular.

Para Raisz (1964), esta provincia está constituida fundamentalmente por un bloque de falla inclinado, de 1600 km de largo y de 48 a 96 km de ancho; en la porción norte existen sierras abruptas, constituidas principalmente por granitos, con alturas que alcanzan los 3300 m. Incisiones a todo lo largo de la provincia son típicas de desiertos, cañones con paredes escarpadas, amplios valles rellenados con arena y una ramificación intensa de tributarios son comunes también.

3.2 Clima

La región se caracteriza por presentar diferentes tipos de climas, como a continuación se indica: (BSk), (BWh) y (BWk), que corresponden a un clima seco templado, muy seco semicálido y muy seco templado, respectivamente. Hacia el sur-oriente el clima es muy seco (BS), al suroeste semifrío subhúmedo con lluvia en invierno (Bsa) y al este y suroeste el clima es templado subhúmedo con lluvias en invierno.

En general la lluvia es escasa en la mayor parte del área y se presentan durante la época de invierno, de diciembre a marzo, con una precipitación media anual de 192 mm, presentando lluvias extraordinarias de hasta 500 mm. La temperatura media es de 14.8º C, siendo julio el mes más caluroso, con una temperatura de 41°C y el mes más frío enero con una temperatura de -10 °C.

Las estaciones climatológicas utilizadas son la estación Ejido Jacume (076), con un periodo de registro de 23 años (1973-1996) ubicada en el noroeste del acuífero y La Rumorosa (022) con coordenada latitud 32° 32’ 55” y longitud 116° 02’ 47” a una altura de 1,232 msnm, ubicada en la parte central del acuífero, con un periodo de registro de 29 años (1971-2000).

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza dentro de la Región Hidrológica 1 Baja California Noroeste. El Río Tijuana es el escurrimiento más importante de la cuenca, a él le corresponde un arroyo de poca importancia, conocido como Arroyo Agua Grande, que desemboca en la zona de la Laguna Salada, región amplia y baja que genera un drenaje deficiente donde los escurrimientos no tienen posibilidades de llegar al Golfo de California, debido a su bajo caudal y a su lejanía con respecto de la costa, por lo que se puede considerar una cuenca endorreica.

El acuífero se ubica dentro de la subcuenca hidrológica del Arroyo Agua Grande que nace en la Sierra de Juárez, al sur del cerro “La Milla”, tiene una extensión superficial de 522 km^2 y se localiza en su mayor parte dentro de la Sierra de Juárez. Dicha subcuenca se encuentra limitada al norte por la frontera internacional con los EUA, internándose al norte con nombre de “Pinto Wash”, al oriente con el parteaguas de la Sierra de Juárez; al sur con los cerros La Milla y El Pedregoso, en tanto que al poniente limita con la cuenca del Río Tijuana. Tiene una longitud de 45 km con un ancho máximo de 18 km, y un mínimo de 3 km en la parte inicia, con un rumbo aproximado de sur a norte para después continuar hacia el noreste.

3.4 Geomorfología

Las estructuras geoformorfológicas presentes en el área están definidas por Sierras y Cerros que predominan en la zona y por pequeños Valles que se forman a lo largo del cauce del arroyo.

Sierras y Cerros: se distribuyen en la parte oriental del área, con una orientación al NW y SW, y representan aproximadamente el 90% del área total. Se considera que las zonas altas forman parte de la Sierra de Juárez hacia el noreste, al sur el cerro La Milla y El Pedregoso y al poniente con la cuenca del Río Tijuana. Las sierras están constituidas por rocas ígneas intrusivas de composición diorítica y granodiorítica. El drenaje que sobre su superficie se ha desarrollado es de tipo dendrítico. Debido a las prominentes elevaciones montañosas que se encuentran en el límite occidental de la región hidrológica, que van desde 300 a 1500 msnm, se consideran de permeabilidad baja a media, dado que, funcionan como zonas de recarga, sin embargo, el agua derivada de las precipitaciones en las partes altas adquiere una gran velocidad debido a los elevados gradientes del terreno, lo cual limita su infiltración al subsuelo.

Valles: Las zonas de valles se intercalan a los largo del cauce del arroyo y están delimitados por la zona montañosa. El valle de mayor tamaño se encuentra al norte de la zona en la parte baja del arroyo donde se localiza el Poblado La Rumorosa; al occidente también se localiza otro valle de importancia donde se asienta el poblado Jacume.

4. GEOLOGÍA

La geología de la zona se presenta en la figura 2, pertenece a la Provincia Terrestre de la Sierra de Juárez-San Pedro Mártir que se caracteriza por su constitución de rocas ígneas intrusivas ácidas del tipo del granito, granodiorita, diorita y tonalitas, así como también rocas metamórficas, principalmente esquistos y gneis.

Localmente el complejo de rocas intrusivas que conforman el área representa la mayor superficie de afloramiento con una topografía abrupta. Este complejo se presenta en forma masiva con fracturamiento y alteraciones fuertes que en ocasiones enmascaran la textura original de la roca. Las rocas sedimentarias no consolidadas, son los depósitos aluviales y fluviales que se localizan en el centro de los arroyos, constituidos por las arenas, limos y boleos, con un alto contenido en micas.

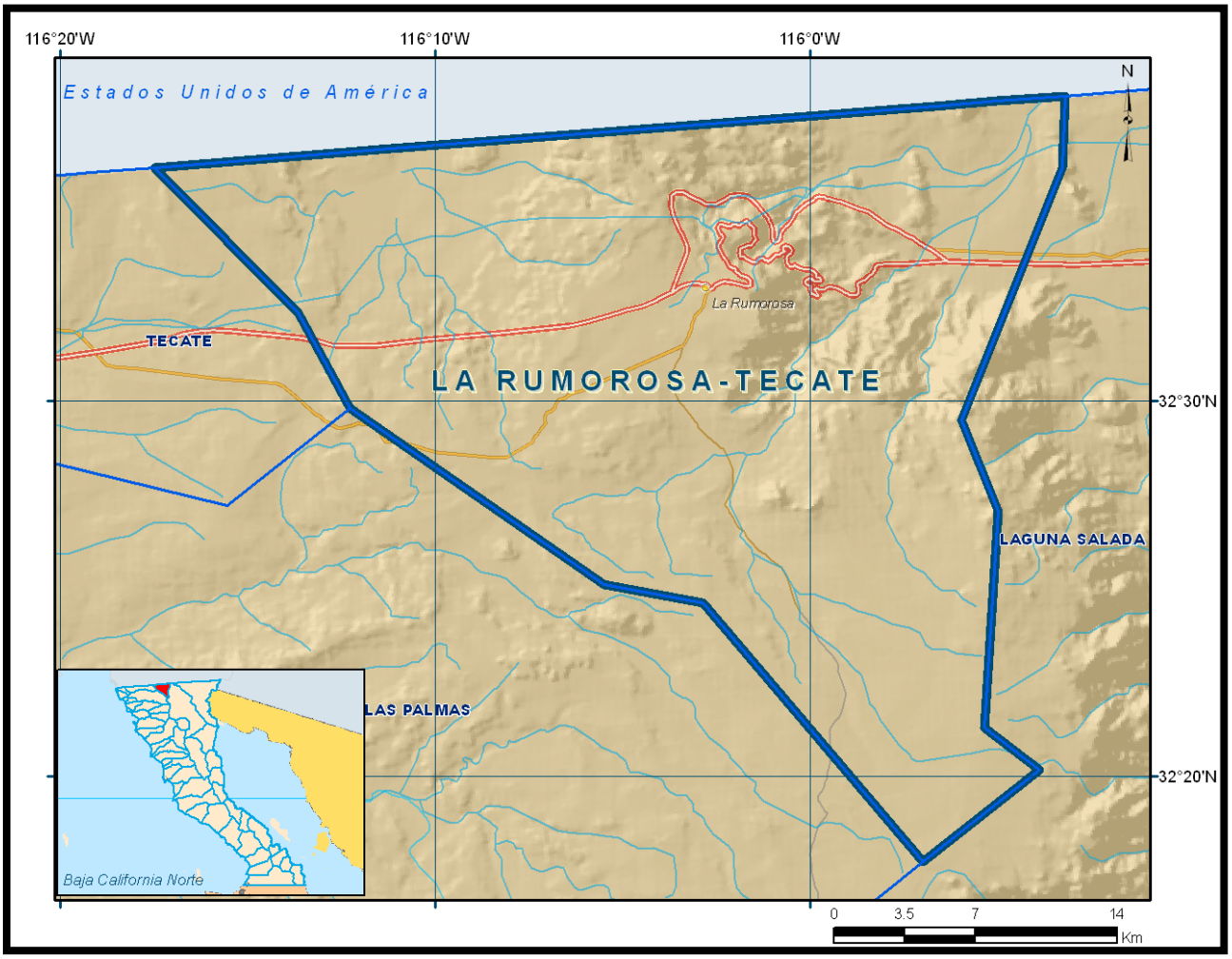


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área.

Aluvión. Es una unidad constituida por materiales no consolidados que ocupan el relleno del arroyo en las partes más bajas de su curso, donde forman depósitos de gravas, arenas y arcillas. Presentan un grado de clasificación variada, dependiendo del recorrido entre la fuente de material y la zona de depósito, a mayor distancia mejor grado de redondez, esfericidad y granulometría más homogénea. Se permeabilidad es media y su espesor varía desde unos cuantos metros, en la cabecera de la cuenca, hasta los 20-25 m en el centro, en la zona de Picachos, donde se localiza el pozo profundo. La dureza del agua en ésta formación se debe quizá a la cercanía con los afloramientos de calizas.

Areniscas y conglomerados. Ésta unidad no está bien diferenciada, se compone de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas de tamaño muy heterogéneo, cementados por arenas y limos. Tienen su origen en la acción combinada de la erosión e intemperismo que disgregan y transportan el material hacia las partes más bajas. Afloran en la porción noroccidental de la cuenca cerca del límite del parteaguas, a la altura del poblado La Rumorosa. Por su posición topográfica carecen de interés geohidrológico. Sin embargo, sus afloramientos son buenos retenedores de agua que se infiltra cuando llueve, la cual transmite al acuífero aluvial. Alcanza una extensión dentro de la zona de las montañas de 25 km^2 en tanto que en la planicie de la laguna llega a los 35 km^2, lo que representa un 11% de total de la cuenca del lado mexicano.

Rocas ígneas intrusivas. Son las rocas más representativas de la región ya que constituyen el núcleo de la sierra, aflorando en toda el área de la cuenca que comprende la Sierra de Juárez. Se encuentra constituida por granito, granodioritas, dioritas y tonalitas, presentando en general una topografía abrupta. Debido a la dimensión del área de sus afloramientos, se consideran batolíticas; el predominio de las granodioritas es mayor en la parte sur de la cuenca y el de las tonalitas hacia la porción norte. Estas rocas se consideran impermeables o de muy baja permeabilidad y sirven como colectoras de agua de lluvia sobre la cuenca a través de su drenaje, la cual conduce hasta el arroyo principal para proseguir su camino hacia el aluvión, donde se infiltra.

Rocas metamórficas. Esta unidad se constituye por esquistos y gneis que afloran hacia la parte la sierra La Rumorosa; al pie de la planicie aluvial. Esta Unidad carece de importancia desde el punto de vista hidrogeológico y se puede considerar como impermeable.

4.2 Geología estructural

Morfológicamente el área presenta formas de fuerte relieve, debido a las estructuras geológicas predominantes ocasionadas por una tectónica de fallamientos, que en términos generales se puede considerar transversales al macizo peninsular, entre las cuales pueden mencionarse fallas normales, fracturas de diferentes dimensiones, así como aparatos, derrames volcánicos y grandes cuerpos intrusivos.

Esta región queda ubicada de acuerdo al mapa tectónico de la República Mexicana según el Ing. Manuel Álvarez Jr. como un levantamiento de edad Cretácico Medio; producto del sistema de

fallamiento se formaron pequeños valles intermontanos que han sido rellenados con materiales dendríticos provenientes de la erosión de las rocas adyacentes.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo a la interpretación cuantitativa de los sondeos eléctricos realizados, únicamente en la zona circundante al poblado La Rumorosa se determinó la morfología geoeléctrica del subsuelo conformado por tres paquetes, el paquete más superficial se asocia con suelos residuales que son materiales granulares de buena permeabilidad que cubren el área del acuífero, con un espesor promedio de 8 m. El paquete que subyace presenta valores de 29-86 Ohm/m considerado de alta permeabilidad y se asocia a una unidad de arenas y gravas con cierto grado de arcillocidad, producto de la desintegración de rocas graníticas, con espesores entre 16 y 64 m. Este estrato descansa sobre un paquete de rocas graníticas basales de muy alta resistividad mayor a los 13,000 Ohm/m, con un espesor estimado de 65 m.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de **tipo libre** y está constituido principalmente por sedimentos no consolidados cuya granulometría varía de gravas, arenas y arcillas, que rellenan el cauce del arroyo y el valle, su espesor promedio varía de 16 a 64 m. Su principal fuente de recarga es el flujo subterráneo proveniente de los subálveos del arroyo.

5.2 Parámetros hidráulicos

La escasa información que existe con relación a la evaluación de los parámetros hidráulicos, sólo permiten definir que la transmisividad varía de **0.6 a 1.1 X10^{-3} m^2/s**. No se han reportado valores para el coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento del acuífero se cuenta con información correspondiente a los años 1990 y 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el periodo de análisis ha descendido gradualmente, ya que para 1990 se registra una profundidad al nivel estático que variaba de 3 a 14 m. Para 2007 la profundidad

varía de 5 a 17 m. Los valores más profundos se son originados por el bombeo de los aprovechamientos que abastecen a la población La Rumorosa (figuras 3 y 4).

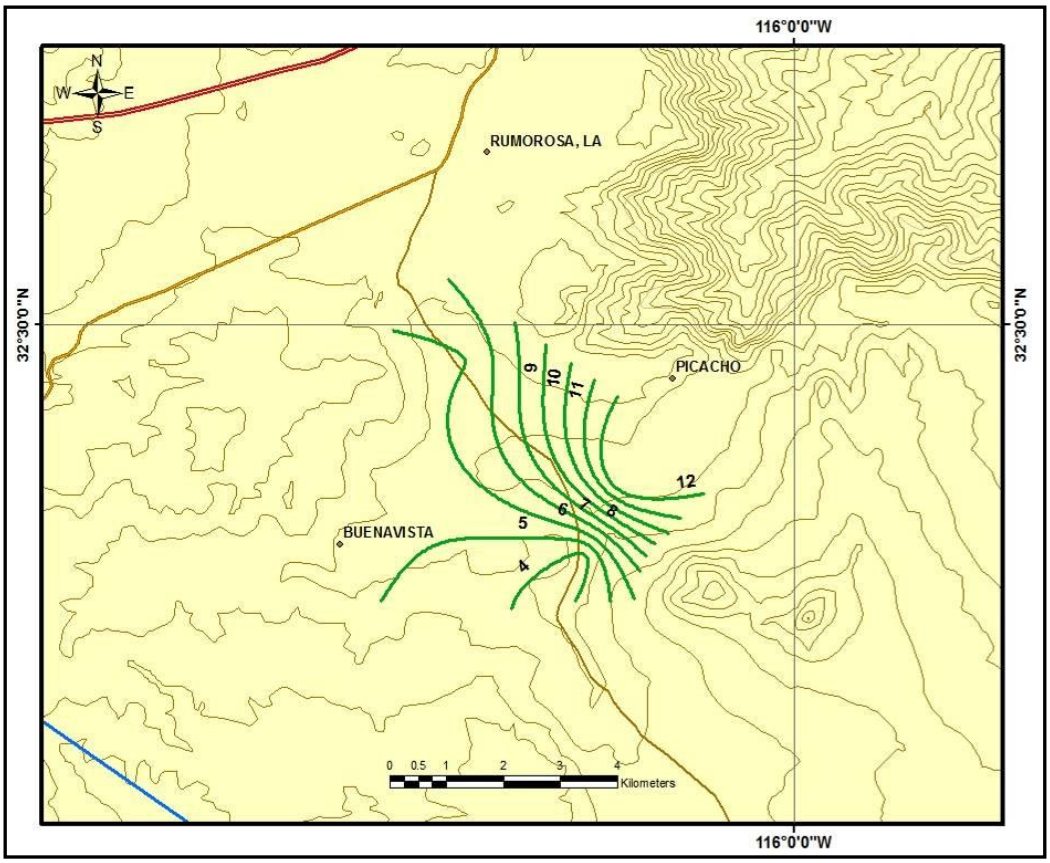


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (1990)

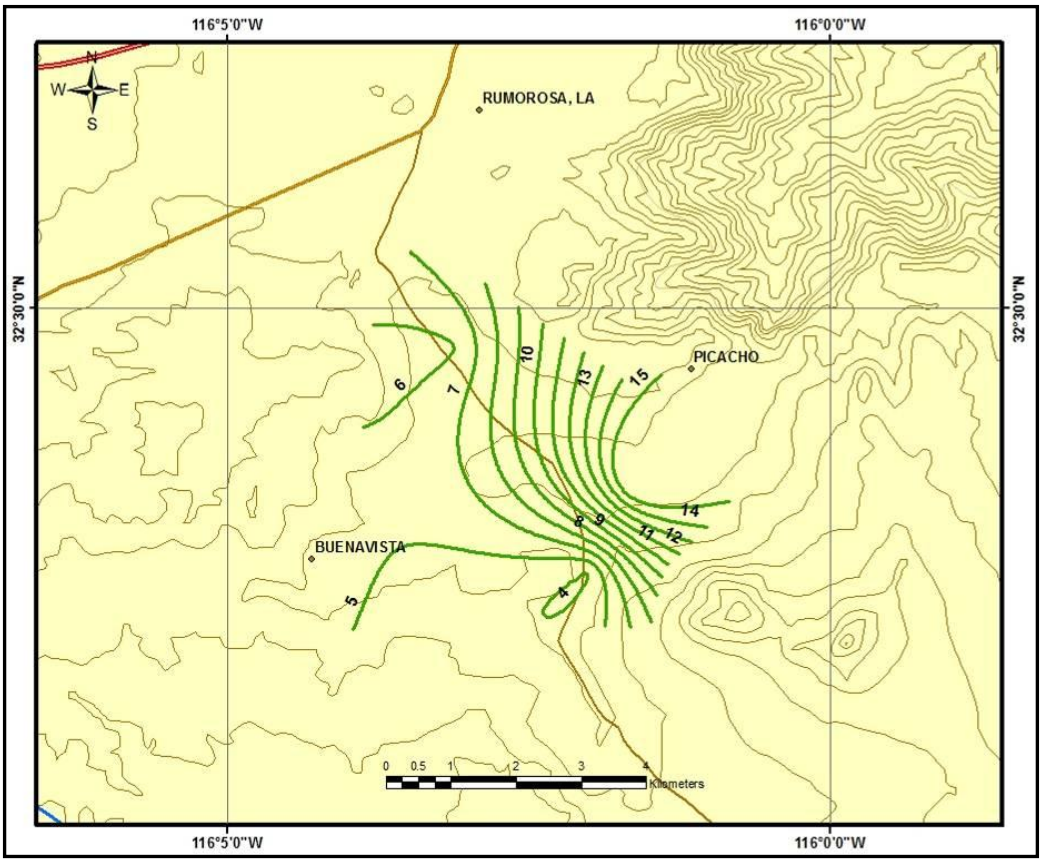


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Es el principal indicador del flujo subterráneo si las cargas están referidas a la elevación media del nivel del mar. De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación generan movimiento de aguas subterráneas hacia donde la elevación de los niveles de saturación es menor, si no existen fronteras que impidan el flujo.

Para el acuífero La Rumorosa-Tecate las elevaciones del nivel estático reflejan que la dirección del flujo del agua en el subsuelo es semejante con el hipotético flujo en condiciones naturales, con dirección suroeste a noreste, que se origina desde la zona montañosa (Cerro Pedregoso y Milla, Sierra de Juárez) hacia la zona de Picahos, para continuar la salida hacia el Cañón Los Llanos (figuras 5 y 6).

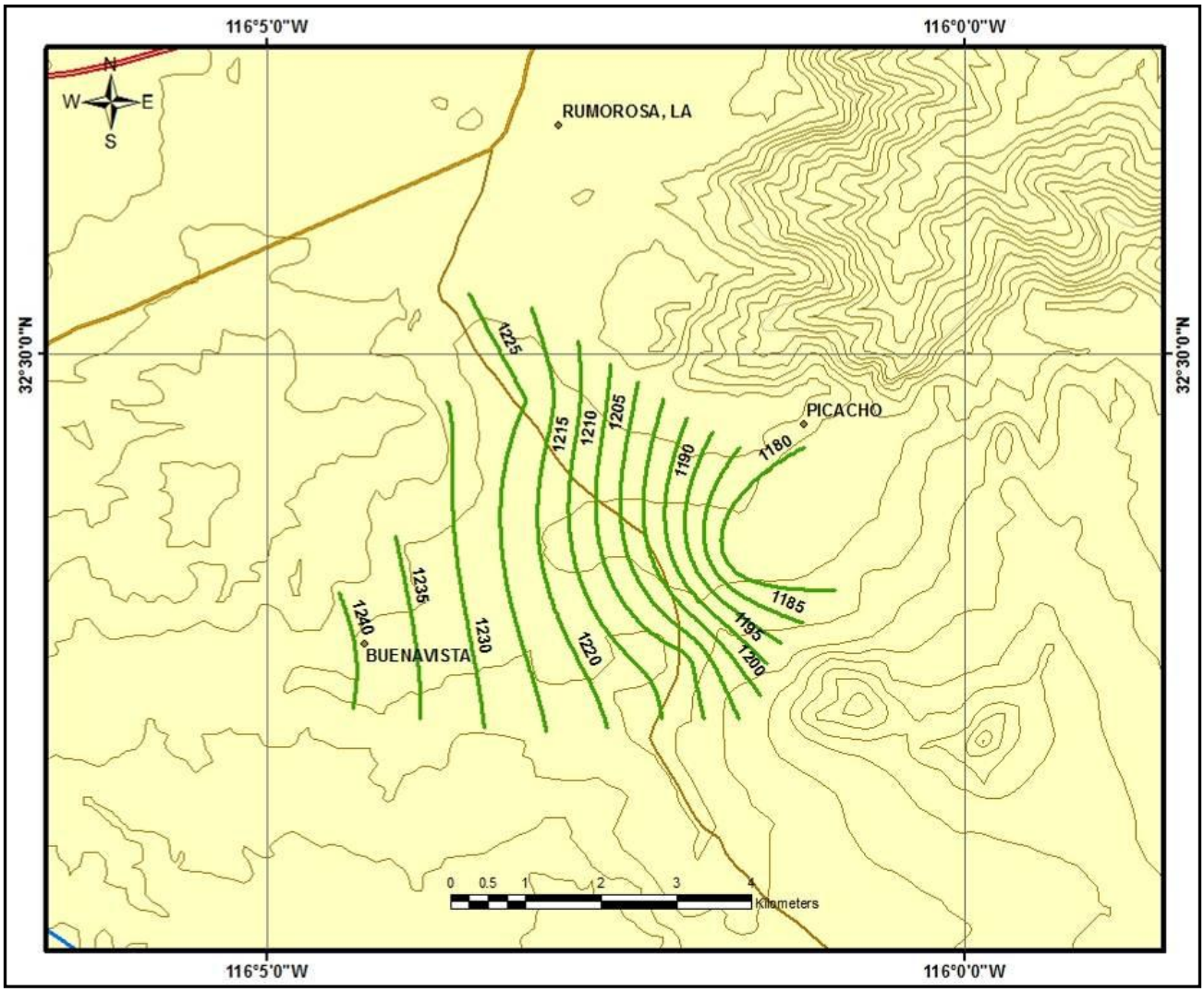


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (1990)

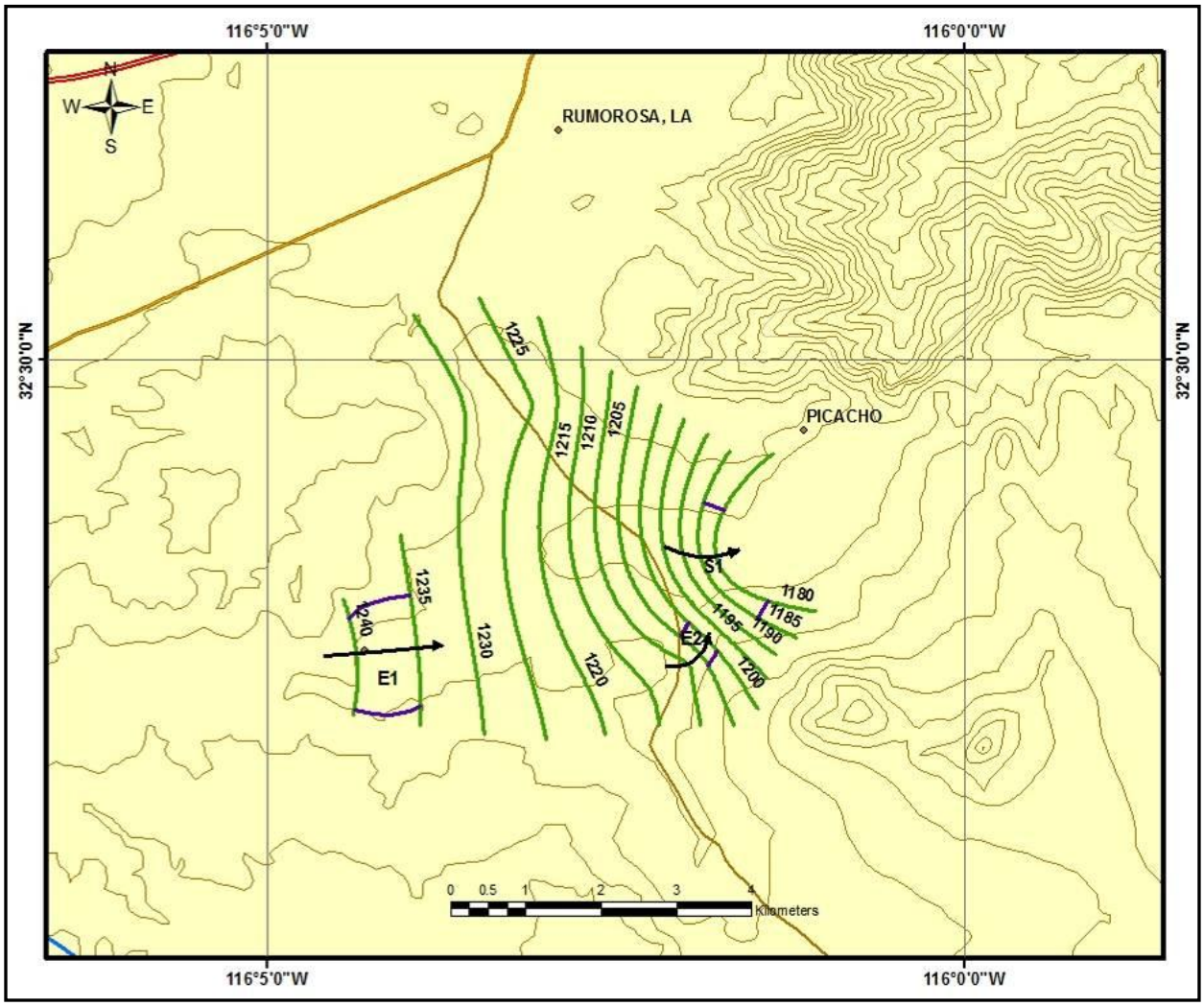


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm y dirección de flujo (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para determinar la evolución del nivel estático con respecto al tiempo se consideró la información piezométrica disponible para el periodo 1990- 2007. Los abatimientos registrados en la zona de extracción son hasta de 2 m, lo que representa 0.1 m anuales. Para otras zonas, ubicadas a mayor elevación topográfica, se han observado recuperaciones puntuales de 0.1 m anuales (figura 7).

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En 1990 se reporta que la calidad del agua varía de regular a buena. Los resultados de los análisis químicos de los aprovechamientos a cielo abierto demuestran que el agua subterránea contiene concentraciones sólidos totales disueltos mayores a los 1000 ppm que establece la norma oficial mexicana para el agua destinada al abastecimiento de agua potable (1236 y 1184 ppm). Localmente, los valores altos de concentración de sulfatos y de dureza del agua pueden estar asociados a la presencia de calizas que se explotan para la fabricación de cal.

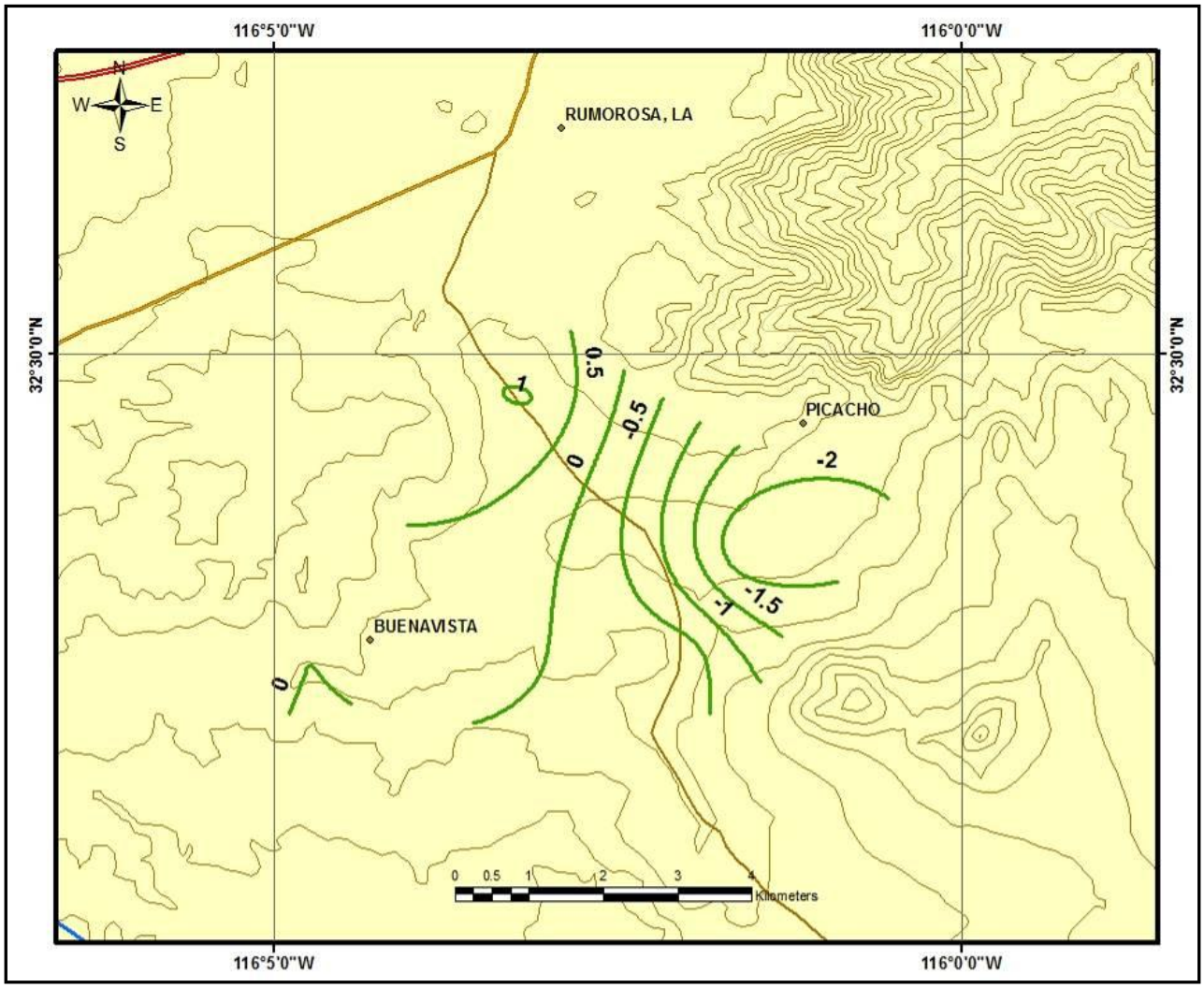


Figura 7. Evolución del nivel estático en m (1990-2007)

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

El volumen de extracción, tomando en cuenta la información del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), es de **0.9 hm^3/año,** de este volumen el 95 % se destina a uso agrícola, 0.7 % se utilizan para satisfacer la necesidades del uso doméstico, 0.3% para el sector pecuario, el 2 % para usos múltiples y el 2.0% restante para uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea involucra el registro de las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento, modificaciones que suceden en un volumen específico de acuífero en un tiempo determinado.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa establece lo 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

El balance de aguas subterráneas se planteó para los años de 1990 y 2007, en una superficie de 30.7 km^2. Las componentes que se requieren conocer en el área para la definición del balance global incluyen cambios en el almacenamiento, evapotranspiración, bombeo, caudal base, entradas y salidas por flujo subterráneo, descarga por manantiales, entre otras. Para el acuífero La Rumorosa-Tecate la ecuación de balance definida es:

$$Eh + Rv - (B + Sh + ETR) = \pm \Delta V(Sy) \qquad (1)$$

Donde:
Eh = Entradas horizontales por flujo subterráneo;
Rv = Recarga vertical por lluvia;
B = Extracción por bombeo;
Sh = Salidas por flujo subterráneo;
ETR = Salida por evapotranspiración;
ΔV = Volumen drenado;
Sy = Rendimiento específico;

7.1 Entradas

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

La recarga inducida se constituye principalmente por el retorno de los excedentes del riego, la infiltración que se produce en las obras hidroagrícolas así como la infiltración debido a las fugas en las redes de agua potable. En la zona, el volumen de agua subterránea explotado para uso agrícola representa más del 90 % del total, sin embargo de acuerdo con los métodos de riego empleados (tecnificados), se considera despreciable el retorno de riego; el volumen destinado al uso público-urbano es muy pequeño y no existen poblaciones importantes en las que se generen fugas en las

redes de distribución del agua potable o en el drenaje, por lo que la recarga inducida (Ri) se considera nula.

7.1.1 Recarga Vertical (Rv)

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 (1). De esta manera, despejando la recarga vertical (Rv) se obtiene la siguiente expresión:

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

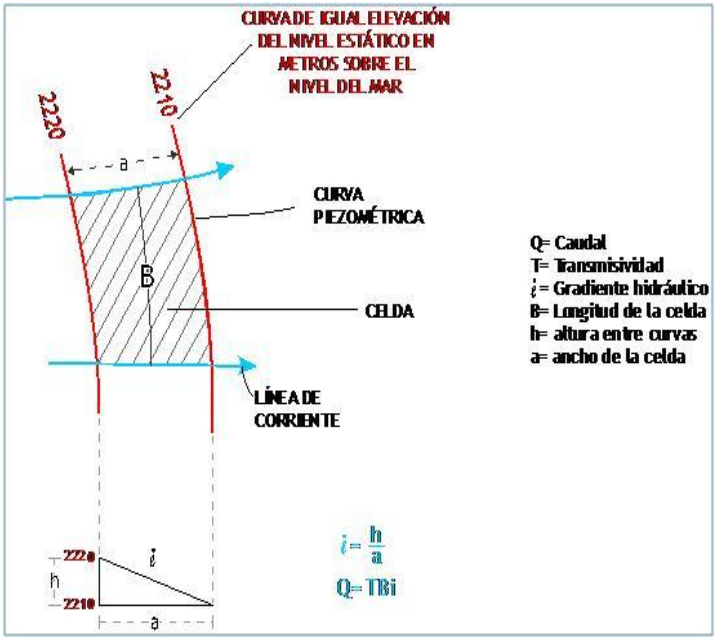
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La estimación de esta componente se realizó utilizando las configuraciones de elevación del nivel estático (figuras 5 y 6), en las cuales se definieron las direcciones y celdas de flujo que junto con la transmisividad y gradiente hidráulico, delimitaron los caudales que circulan en el acuífero.

La componente de flujo subterráneo se calculó para los años 1990 y 2007 y con base en la configuración se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{Q = B * i * T}$$

Donde:
Q = Gasto;
T = Transmisividad;
B = Longitud de la celda;
i = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 1990 es de 0.4 hm^3 (tabla 2), mientras que para el 2007 se obtuvo un volumen de 0.5 hm^3 (tabla 3). Con estos valores anuales, se determinó que para el periodo de 1990 – 2007 un volumen de entrada subterránea de 7.6 hm^3 /año. Por lo tanto, en promedio se tiene un valor de **Eh = 0.4 hm^3/año**.

Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 1990

Celda	T (10^{-3} m^2/s)	B (10^3 m)	i	Q1 (m^3/s)	Vol_1 anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E_1	1.111	1.332	0.0065	0.0097	0.3
E_2	0.579	0.421	0.0118	0.0029	0.1

Tabla 3. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2007

Celda	T (10^{-3} m^2/s)	B (10^{-3} m)	i	Q1 (m^3/s)	Vol_1 anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E_1	1.111	1.35	0.0064	0.0096	0.3
E_2	0.579	0.414	0.0225	0.0054	0.2

7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre por flujo subterráneo (Sh), la evapotranspiración (ETR) y el bombeo de los aprovechamientos de agua subterránea (B).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Esta componente se representa 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. Para su cuantificación se utilizó la relación empírica de Gardner y Fireman (1958), la cual determina la tasa máxima de evaporación, a partir de las propiedades hidráulicas del medio y su granulometría.

Esta relación se encuentra representada en la figura 8, relación de la tasa máxima de evaporación y profundidad de influencia, descartando así los métodos de Turc y Smith ya que éstos para considerar una evaluación confiable, la precipitación debe ser mayor de 320 y 300 mm respectivamente. La expresión matemática de Gardner y Fireman es:

$$E = Ks\left[\frac{-a\pi}{LN\left(sen\left(\pi / N\right)\right)}\right]^N$$

Donde:

Ks = Conductividad Hidráulica a Saturación [cm/día];

a y N = Parámetros que representan la forma del suelo. Donde **a** [cm] y **N** [adim];

L= Profundidad [cm];

π **=**3.1416;

El área del acuífero, presenta una granulometría que varía de media a gruesa, conformada por arenas y cantos rodados que han sido arrastrados a lo largo del arroyo. En la parte media, al suroeste del arroyo, es más abundante la cantidad de material fino. Los parámetros a y N son **a = -21cm** y **N = 3.6**, mientras que **Ks = 50 cm/día**. Con los valores de estos parámetros se construye la gráfica para la relación tasa máxima de evaporación–profundidad de influencia (figura 8).

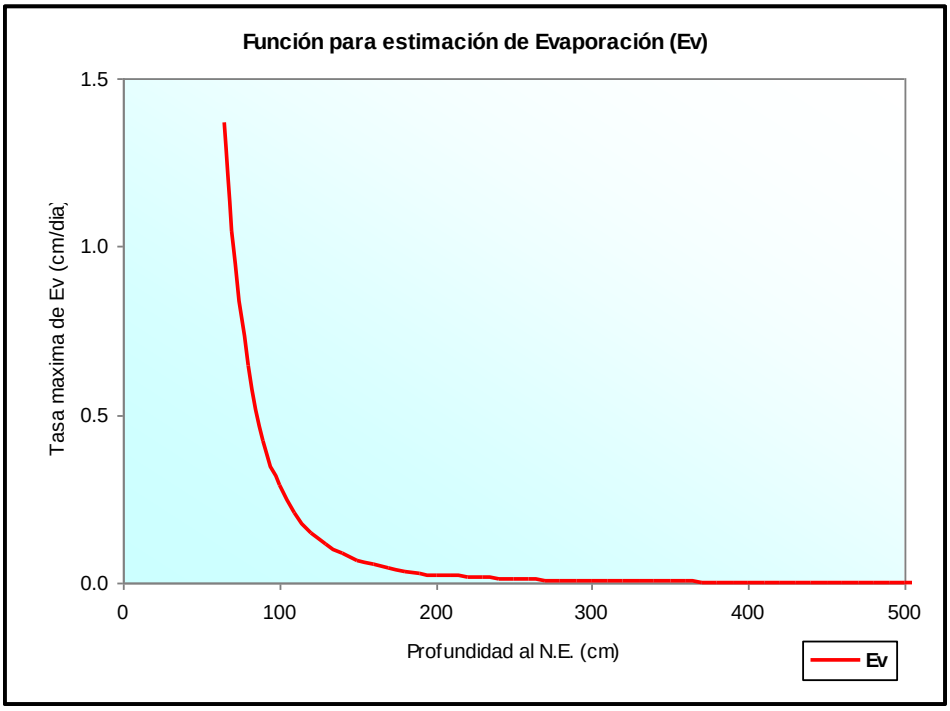


Figura 8. Relación de la tasa máxima de evaporación y profundidad de influencia

Tabla 4. Volumen evapotranspirado de acuerdo al área, con profundidades susceptibles al fenómeno de evapotranspiración

Prof. media al nivel estático (cm)	Área (km^2)	Tasa de evap. (mm/día)	Volumen de evap (hm^3)
1990			
100	5	2.9	0
200	5	0.24	0
300	5	0.06	0.1
2007			
100	5	2.9	0
200	5	0.24	0
300	5	0.06	0.1

El valor estimado para el volumen evapotranspirado para el año 1990 fue de 0.1 hm^3/año al igual que para el 2007. Con estos valores estimados de los dos años de análisis se obtuvo un valor de 1.8 hm^3 para este periodo, que representa un valor promedio anual de **0.1 hm^3**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **0.9 hm^3/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Para calcular el volumen que se descarga naturalmente del área de balance por flujo subterráneo, se consideraron los parámetros hidráulicos del mismo y las configuraciones que se construyeron al igual que para el cálculo de entradas. En este caso se definió solo una celda de salida (tablas 5 y 6).

Tabla 5. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo, 1990

Celda	T (10^{-3} m^2/s)	B (10^3 m)	i	Q1 (m^3 /s)	Vol$_1$ anual (hm^3)
SALIDAS LATERALES					
S_1	1.042	1.498	0.0143	0.0223	0.7

Tabla 6. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo, 2007

Celda	T (10^{-3} m^2/s)	B (10^{-3} m)	i	Q1 (m^3 /s)	Vol$_1$ anual (hm^3)
SALIDAS LATERALES					
S_1	1.042	1.627	0.0147	0.0249	0.79

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) para 1990 es de 0.7 hm^3 y para 2007 de 0.8 hm^3. Con estos valores anuales, se determinó que para el periodo de 1990 – 2007, el volumen de salida es de 13.4 hm^3, lo que representa un volumen anual de **0.7 hm^3**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cambio de almacenamiento se estimó a partir de la evolución de las elevaciones de los niveles estáticos registrada durante el periodo 1990–2007. De los resultados de su cálculo se desprende que el cambio en el volumen almacenado **(ΔV)** fue de **-4.4 hm^{3,}** en ese periodo de tiempo, que representa un valor promedio anual de **-0.22 hm^3,** al multiplicar este valor por el coeficiente de almacenamiento Sy de 0.05, se tiene un cambio de almacenamiento de -0.01 hm^3 anuales Por lo que para los fines del balance de aguas subterráneas, se considera nulo. **ΔVS = 0**

Solución de la ecuación de balance

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

$$Rv = \Delta V(Sy) + (B + Sh + ETR) - Eh \qquad (2)$$

$$Rv = 0.0 + 0.9 + 0.7 + 0.10 - 0.4$$

$$\mathbf{Rv = 1.3\ hm^3\ anuales}$$

De esta manera, el valor del recarga total (Rt) es:

$$Rt = Eh + Rv$$

$$Rt = 0.4 + 1.3$$

$$\mathbf{Rt = 1.7\ hm^3\ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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:

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS \qquad (3)}$$

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, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es **1.7 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 al acuífero.

En este sentido la descarga natural comprometida se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal, para este caso no se consideran descargas naturales

comprometidas, ya que las salidas subterráneas son de forma intermitente aguas abajo hacia el Arroyo Agua Grande, que desemboca en la zona de la Laguna Salada, siendo ésta un área donde se presentan altas evaporaciones; por lo tanto **DNCOM = 0**.

8.3 Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)

El volumen anual de extracción de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección de Administración del Agua, con fecha de corte al **30 de septiembre de 2008** es de **899,623 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 referida anteriormente, de acuerdo con la expresión (3), se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \qquad (3)$$

$$DAS = 1.7 - 0.0 - 0.899623$$

$$\mathbf{DAS = 0.800377\ hm^3/año}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **800,377 m^3 anuales** para otorgar nuevas concesiones en el acuífero.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que el valor sea mayor, sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Gobierno del Estado de Baja California-Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas 1990. Estudio Geohidrológico para el poblado La Rumorosa Municipio de Tecate, Baja California.

Gobierno del Estado de Baja California –Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate. 2007. Estudio Geoeléctrico en el Valle de Picachos, Municipio de Tecate, B. C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Aprovechamientos Hidráulicos. 1982. Estudio geohidrológico cuantitativo de la cuenca Tijuana-Tecate. Elaborado por GENESA CONTRATO GZA-82-51-EG.