

*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 Cuitaca (2660), Estado
de Sonora***

*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 SONORA							
2660	CUITACA	7.3	0.7	5.636368	2.8	0.963632	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 2660 CUITACA, ESTADO DE SONORA***

México, D.F., Enero de 2010

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	3
	Antecedentes	3
1.1.	Localización	3
1.2.	Situación administrativa del acuífero	5
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1.	Provincias fisiográficas	6
3.2.	Clima	7
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA	8
4.1.	Estratigrafía	9
4.2.	Geología estructural	13
5.	HIDROGEOLOGÍA	15
5.1.	Tipo de acuífero	15
5.2.	Parámetros hidráulicos	15
5.3.	Piezometría	16
5.4.	Comportamiento hidráulico	16
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	16
5.4.2.	Elevación del nivel estático	16
5.4.3.	Evolución anual del nivel estático	16
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	20
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
7.1.	Entradas	23
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	23
7.2.	Salidas	24
7.2.1.	Bombeo (B)	25
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.2.3.	Evapotranspiración (ETR)	25
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	27
8.	DISPONIBILIDAD	28
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	28
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	28
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	28
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	29
9.	BIBLIOGRAFIA	29

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 Cuitaca, definido con la clave 2660 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción norte del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 30° 48' 9.1" y 31° 12' 45.5" de latitud norte, y 110° 23' 3.9" y 110° 33' 33.3" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 477 km².

Colinda al noroeste con el acuífero Río Santa Cruz, al sureste con Río Bacanuchi, al noreste con Río San Pedro y al suroeste con el acuífero Cocóspera, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente se encuentra ubicado en los municipios de Santa Cruz, Cananea e Imuris.

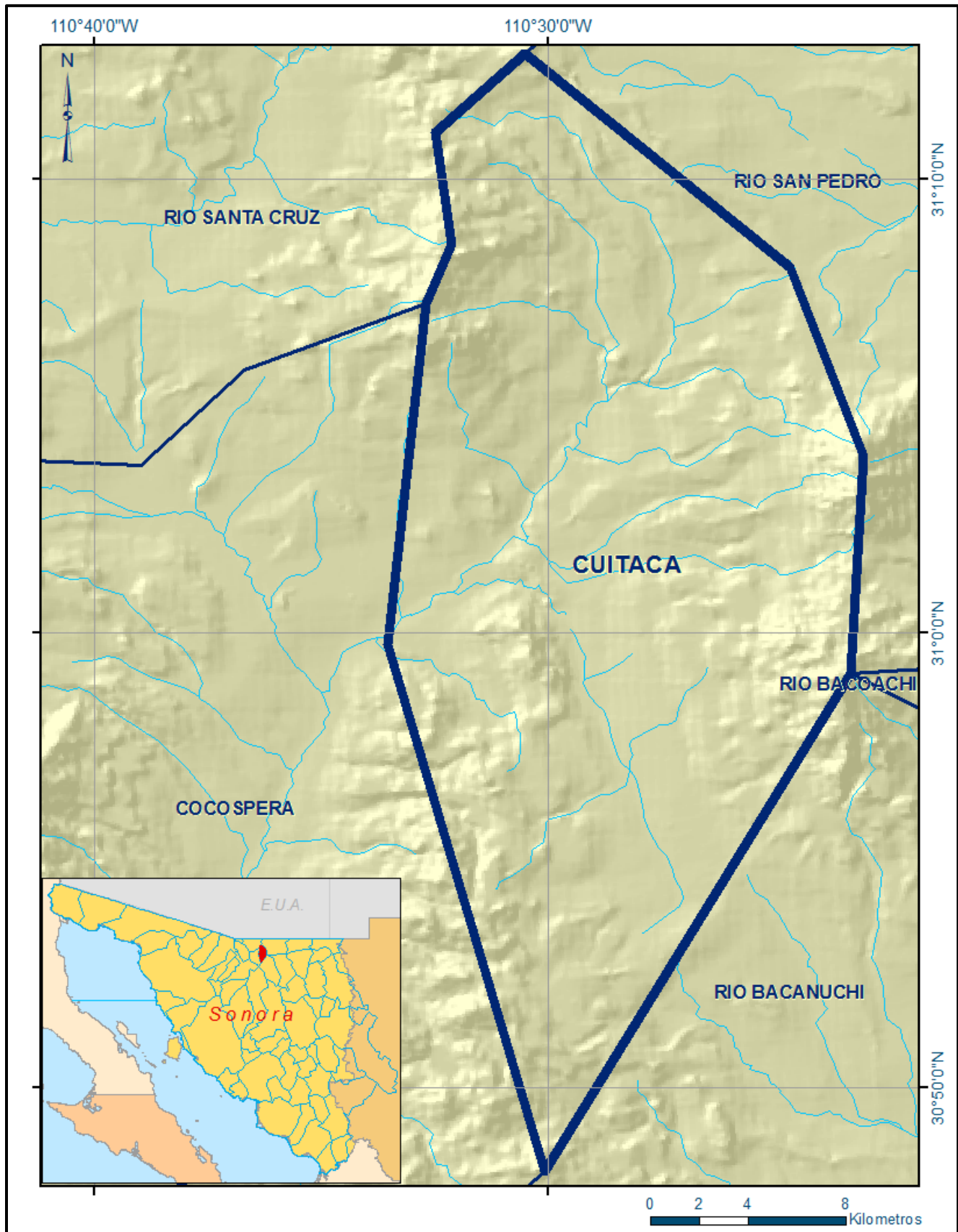


Figura 1. Localización del acuífero

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 2660 CUITACA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	32	41.9	31	7	16.2
2	110	32	8.8	31	8	34.5
3	110	32	29.6	31	11	1.9
4	110	30	32.1	31	12	45.5
5	110	24	40.8	31	8	3.3
6	110	23	3.9	31	3	54.3
7	110	23	21.1	30	59	6.8
8	110	30	6.0	30	48	9.1
9	110	33	33.3	30	59	45.3
1	110	32	41.9	31	7	16.2

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cuitaca pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero en la parte norte y es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de septiembre de 1978; el segundo en la parte sur y es el *“Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Son.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967. Ambos vedas son tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para uso doméstico.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2010, el municipio de Cananea se clasifica como zona de disponibilidad 4 y los municipios de Santa Cruz e Imuris zona 6. El usuario principal del agua es el industrial. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna; ni tampoco se ha constituido, hasta la fecha, Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo diversos estudios geohidrológicos de evaluación. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA. UNIVERSIDAD DE SONORA, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la Gerencia Regional Noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. A parte de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de configuración del nivel estático. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: LOS VIDRIOS, RÍO ALISOS, ARROYO SAHUARO, SAHUARAL Y CUITACA EN EL ESTADO DE SONORA, elaborado por la empresa IDEAS, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2009. El estudio incluyó actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones y estimación de parámetros hidráulicos, con las que fue posible plantear el balance de aguas subterráneas en los cinco acuíferos. Además de los planos temáticos, se incluyen los de configuración del nivel estático, así como las tablas de resultados obtenidos, el balance de aguas subterráneas y la estimación de la disponibilidad de aguas subterráneas para cada acuífero.

Del primer estudio se utilizó la información piezométrica como apoyo en la estimación de la evolución del nivel estático. La información generada en el segundo estudio, que corresponde al análisis climatológico, geología, geofísica, piezometría e hidrogeoquímica, es la más completa, por lo que constituye la base para la elaboración de este documento, de manera que sus resultados y conclusiones se mencionan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

La parte norte del acuífero Cuitaca se encuentra dentro de la provincia Sierras y Llanuras del Norte, subprovincia Llanuras y Médanos del Norte; y la parte sur en la provincia Sierra Madre Occidental, y subprovincia Sierras y Valles del Norte (INEGI, 2000).

La subprovincia Llanuras y Médanos del Norte está formada por extensos valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras. Predominan las rocas sedimentarias (principalmente conglomerados), aunque también se encuentran pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas ácidas. Dentro de esta subprovincia se encuentran las siguientes formas fisiográficas: Llanura Aluvial, Sierra Plegada y Valle Aluvial Intermontano, que cubren el 24%, 20% y 2% del área total del acuífero, respectivamente.

La subprovincia Sierras y Valles del Norte está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. En las sierras dominan las rocas

volcánicas ácidas y en los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario). Dentro del acuífero se presenta únicamente la Sierra Alta como forma fisiográfica, cubriendo el 54% de área restante.

3.2. Clima

El clima que prevalece en la región, según la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1981), es el BS1 kw (x'), que corresponde a un clima semiseco, con lluvias en verano que se manifiestan en los meses de Julio y Agosto. Sus temperaturas medias anuales van de 12.0° a más de 22.0°C y su precipitación total al año es del orden de 400 a 700 mm.

Para el análisis climatológico, se consideró la información de dos estaciones climatológicas: la estación Santa Cruz administrada por la Comisión Nacional del Agua y la estación Cananea, que está a cargo de la compañía minera ubicada en esa ciudad. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **574.2 mm** y **17.5 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1609.4 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

El acuífero Cuitaca, se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 8 “Sonora Norte”, cuenca Río Concepción (B) y subcuenca Arroyo Cocóspera (f). La cuenca del arroyo Cocóspera tiene sus orígenes en el parteaguas con el Río Santa Cruz que drena territorio de los Estados Unidos de América, en la sierra El Chivato, a una altitud de 1,800 m. Inicia con el nombre de arroyo El Carrizo, con curso general sur y confluye al arroyo Cocóspera para tomar rumbo suroeste hasta unirse al colector principal, el Río Magdalena, por su margen izquierda en las inmediaciones del poblado de Imuris, a una altitud de 840 m.

3.4. Geomorfología

De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo, 1990), en el acuífero Cuitaca se presentan diferentes formas morfológicas, donde predominan principalmente las laderas montañosas altas y la planicie con patrón divergente superior, seguido por laderas bajas y lomeríos estables. Las laderas montañosas altas y bajas están formadas por rocas volcánicas intermedias ácidas, del Cretácico superior y del Terciario Paleoceno. La planicie está constituida por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario; y el lomerío está formado por un conglomerado polimíctico del Cuaternario Pleistoceno.

La región se encuentra formada por estructuras complejas, rocas ígneas y sedimentarias, y valles con una alineación NNW-SSE originados por fosas tectónicas que dieron lugar al depósito de gran

cantidad de materiales clásticos acarreados desde las partes altas de las montañas. Las principales formaciones montañosas dentro de la cuenca tienen altitudes comprendidas entre los 1,300 a 1,500 m de elevación sobre el nivel medio del mar.

4. GEOLOGÍA

La evolución tectónica del Estado de Sonora está determinada por un conjunto de eventos magmático-estructurales, registrados mayormente desde el Jurásico Tardío hasta el reciente, los cuales han dado lugar a una gran diversidad de líneas de evidencia que dejan clara la complejidad de la historia tectónica del Noroeste de México. La tectónica anterior al Jurásico permanece bajo la sobreposición de un sistema estructural regional que ha sido principalmente identificado debido a la ocurrencia de la megacizalla Mojave-Sonora. Esta estructura es una falla transformante de desplazamiento lateral izquierdo que probablemente ocurrió en el Jurásico Medio-Tardío (Anderson y Silver, 1979). Esta tectónica transcurrente yuxtapone dos bloques tectónicos con características diferentes: el Bloque Caborca al sur (Campa y Coney, 1983), con rocas que corresponden al basamento proterozoico con edades entre 1800 y 1700 Ma, y el Bloque Pápago al norte (Haxel *et al.*, 1984), cuyas rocas más antiguas corresponden al arco magmático Jurásico con edades dentro de un intervalo aproximado entre 180 y 170 Ma.

Durante el Cretácico Superior, aproximadamente a partir de los 90 Ma, inició un largo periodo de subducción de la Placa Farallón (ahora extinta) bajo la Placa Norteamérica. En este proceso, la Placa Farallón ocasionó la activación de un intenso magmatismo y una fuerte deformación continental mediante sistemas estructurales compresivos y generación de grandes fallas inversas de bajo ángulo (cabalgaduras) en la corteza superior, sobreponiéndose a los eventos tectónicos anteriores y por lo tanto, afectando a todas las secuencias Cretácicas y pre-Cretácicas con plegamiento, segmentación y deformación frágil y dúctil.

Durante todo este episodio de subducción se dio lugar la Orogenia Laramide, evento que se extiende a lo largo de todo el margen Pacífico de Norteamérica, cuyos productos directos están representados por el emplazamiento de secuencias volcánicas calcialcalinas depositadas simultáneamente con secuencias sedimentarias de cuencas antearco y trasarco, las cuales se interrelacionan para formar grupos estratigráficos de grandes espesores, representados en Sonora principalmente por las formaciones vulcanosedimentarias del Cretácico Superior.

Además, trajo consigo una extensiva producción magmática que emplazó cuerpos plutónicos a diferentes niveles corticales y que en la actualidad corresponden con la gran cantidad de masas batolíticas de composición granítica dispuestas a lo largo de todo el margen Pacífico de América del Norte, donde las secuencias vulcanosedimentarias del Cretácico representan la contraparte volcánica-superficial de este magmatismo.

Hacia el final de este período, durante el Eoceno-Oligoceno, se emplazan enormes cantidades de riolitas e ignimbritas que edifican la Sierra Madre Occidental (SMO; McDowell & Clabaugh, 1979). Este volcanismo es cronológicamente continuo pero estratigráficamente discordante sobre las secuencias vulcanosedimentarias del Cretácico Superior, ya que la subducción comenzaba su cese y la deformación que le acompañaba era mínima o ausente.

De esta forma, una vez concluida la subducción inicia un adelgazamiento cortical que dio origen a la provincia extensional del Basin and Range en el Mioceno. Este evento representa una etapa de relajamiento cortical, contrarresta el efecto compresivo de la subducción y extiende la litósfera generando un sistema estructural extensional que desarrolla una asociación horst-graben que muestra patrones semiortogonales al vector de subducción (NNW-SSE). Así, los bajos estructurales (graben) son cuencas alargadas NW-SE que son rellenadas por molasas continentales producto de la erosión de los altos estructurales (horst).

Estas unidades sintectónicas típicamente están representadas por conglomerados polimícticos (ocasionalmente oligomícticos) generalmente consolidados y cementados con material autigénico carbonatado y zeolitas que son el producto de la degradación directa de los epiclastos vítreos del volcanismo riolítico de la SMO (Cochemé *et al.*, 1991). Esta secuencia sedimentaria se asocia a un volcanismo basáltico calco alcalino cuyo emplazamiento se propicia gracias a la presencia de las fallas con ángulos obtusos de gran profundidad, típicas de sistemas estructurales en extensión.

Hacia el final del Basin and Range, en el Plioceno, inicia la apertura del Golfo de California, la cual actualmente se encuentra activa (en proceso de oceanización) y ha sido muy documentado como ejemplo ideal desde la concepción de la teoría de la tectónica de placas. A lo largo de su área de influencia, el Golfo de California representa el cambio de un régimen tectónico rifting (al sur del Golfo de California) a un ambiente transformante lateral derecho (al norte), que constituye el límite de placa entre la placa Norteamérica y la placa Pacífico y trae consigo la instalación de un sistema estructural complejo que tiene influencia en las zonas que le bordean para crear la Provincia Extensional del Golfo. Aunque es de gran importancia en las zonas costeras, su efecto es de carácter semi-regional.

Durante el Pleistoceno se da lugar un evento erosivo que reajusta la topografía inestable y que produce un material conglomerático de relleno que en ocasiones llega a poseer espesores de algunos cientos de metros, representando una estabilidad tectónica relativa desde el inicio de la subducción hacia los 90 Ma.

4.1. Estratigrafía

El Acuífero Cuitaca cuenta con 10 unidades litoestratigráficas que varían en edad del Proterozoico al Reciente, y están representadas por rocas ígneas, volcánicas y sedimentarias (figura 2).

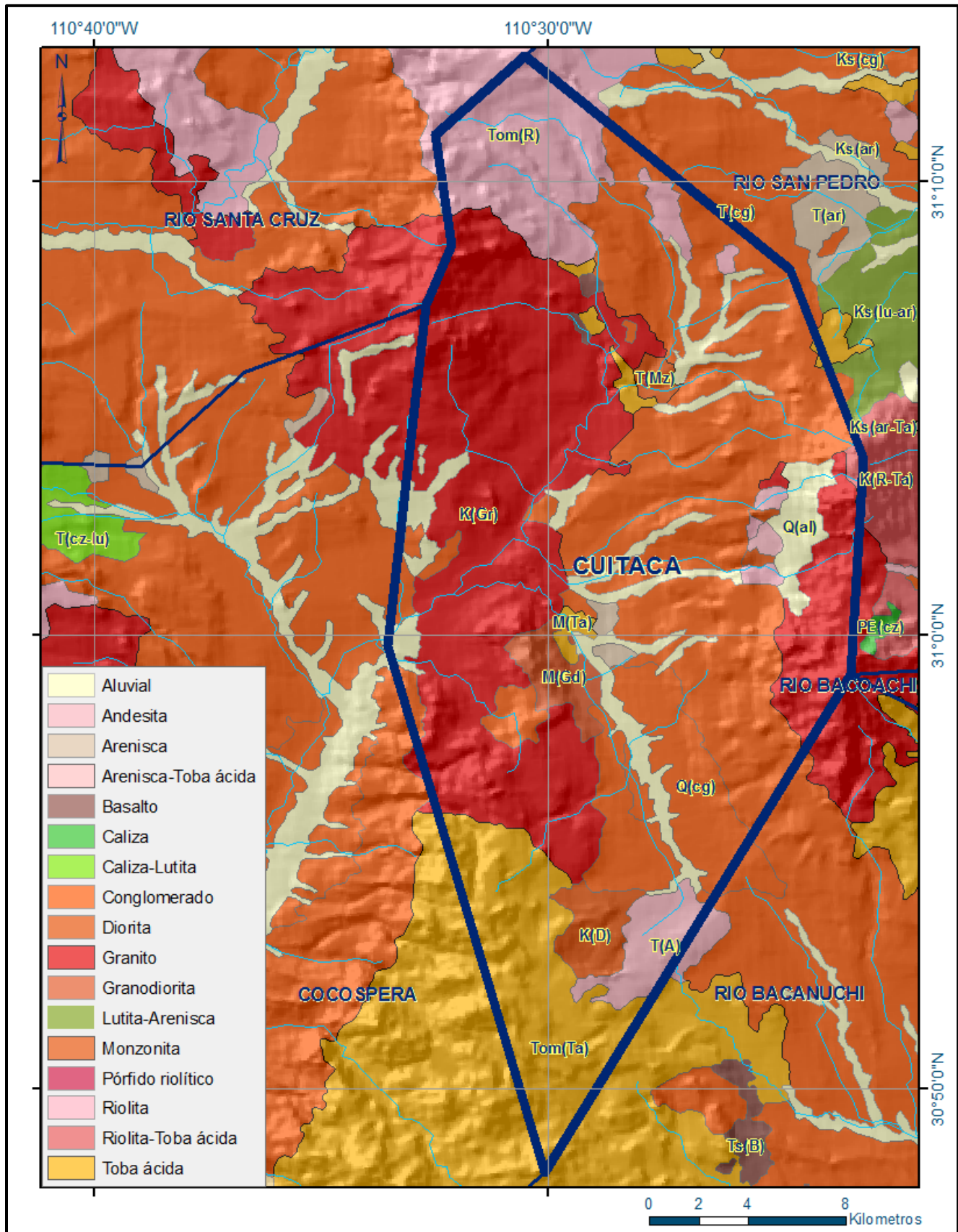


Figura 2. Mapa geológico del acuífero

La secuencia de rocas expuestas en la región se menciona a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

Proterozoico Medio (pTmGr)

Esta unidad corresponde con cuerpos intrusivos de composición granítica que afloran como pequeños remanentes en las partes altas del acuífero. Los afloramientos más representativos ocurren hacia el este del acuífero y en su parte central. Al oeste del poblado de Cuitaca, existen pequeños afloramientos intrusionados por masas ígneas del Mesozoico de dimensiones batolíticas que permiten considerar que estos cuerpos ígneos del Proterozoico son en realidad techos colgantes.

Paleozoico (PdpCz-Ar)

El intervalo Devónico-Pérmico consiste de secuencias estratificadas depositadas en un ambiente marino muy somero y de plataforma continental, están constituidas de caliza, arenisca, caliza arcillosa, conglomerado, lodolita y dolomía, con un espesor aproximado de 1200 m. Estas secuencias afloran en la porción oriental del acuífero, y en general, están en contacto discordante y por falla normal con las rocas cámbricas subyacentes, observándose una relación similar con las unidades del Jurásico Inferior-Medio y Cretácico Superior sobreyacentes.

Jurásico Inferior-Medio (JimR-Ar)

Las rocas del Jurásico Inferior-Medio se encuentran ampliamente distribuidas en las porciones centro y norte del acuífero. Se presentan como afloramientos continuos que constituyen el macizo principal de las sierras paralelas orientadas noroeste-sureste. La unidad consiste en derrames y tobas de composición riolítica con intercalaciones de arenisca. La mayor parte de los afloramientos presentan plegamiento provocado por el intenso fallamiento que afecta a esta unidad, originando en ocasiones zonas cizalladas.

La riolita presenta color gris claro ligeramente rosado, textura porfídica, constituida por fenocristales de cuarzo subhedral, ortoclasa, albita-oligoclasa, vidrio volcánico, biotita, magnetita y minerales de alteración como illita-sericita, clorita, hematita y montmorillonita. La toba riolítica es de textura que varía de afanítica a porfídica, color gris claro ligeramente rosado y blanquecino, constituida de cuarzo, ortoclasa, plagioclasa en matriz afanítica, con microfracturas rellenas con óxidos de hierro y cuarzo.

La arenisca es de color gris claro con tonos rosa y morada, de grano medio, en estratos delgados a medianos, constituida de granos redondeados y subredondeados de cuarzo, feldespato y óxidos de hierro en una matriz cuarzo-feldespática.

El contacto inferior no se observa, sin embargo la secuencia se encuentra afectada por las intrusiones félsicas Jurásicas y Terciarias. El contacto superior es discordante con las rocas clásticas del Jurásico superior-Cretácico inferior que las cubren, y discordante y tectónico por falla normal con unidades más jóvenes.

Cretácico Superior (Ks A-TA)

Las rocas volcánicas de composición intermedia constituidas por andesita, toba andesítica, aglomerado andesítico y arenisca tobácea, se encuentran expuestas en las porciones centro, norte y oriental del acuífero.

La andesita es de color gris-verdoso con textura que varía de porfídica a afanítica. Su composición mineralógica consiste de oligoclasa-andesina, mica alterada, apatito, óxidos de fierro, y minerales de alteración como epidota, minerales arcillosos, sericita, clorita, hematita, calcita, con piritita oxidada diseminada y rellenando fracturas. La toba andesítica es de color gris-verdoso y gris-azuloso con tonos morados, de textura afanítica-porfídica, con estratificación mediana a gruesa, intercalada con arenisca tobácea y aglomerados. El aglomerado andesítico presenta una coloración gris-verdosa, con clastos de varios centímetros de diámetro de rocas de composición intermedia en una matriz tobácea.

Se encuentra cubriendo discordantemente a las unidades volcánicas y metamórficas Jurásicas e intrusionadas por los plutones laramídicos, y cubiertas discordantemente por las rocas volcánicas y sedimentarias terciarias.

Cretácico Superior-Paleógeno (KsTpaGr-Gd)

Las intrusiones batolíticas de composición granítica-granodiorítica se encuentran ampliamente distribuidas en el área de estudio en las sierras El Chivato y San Antonio. Se encuentran afectando a las unidades pre-terciarias, principalmente a las rocas volcánicas y metamórficas del intervalo Jurásico-Cretácico, y son cubiertas discordantemente por las rocas volcánicas y sedimentarias del Terciario y Cuaternario. El batolito presenta variaciones de coloración de gris claro-blanquecino a gris-verdoso y rosa, su textura es porfídica y fanerítica de grano medio, constituido de feldespato potásico, albita-oligoclasa, cuarzo, biotita, con minerales de alteración como sericita, clorita y hematita.

Terciario-Eoceno (TeGd-D)

El afloramiento se encuentra en la porción centro sur del acuífero. Esta roca es de color gris claro-moteada de textura fanerítica. Algunas veces la intrusionan diques aplíticos, andesíticos y riolíticos, y ocasionalmente presenta hilos de cuarzo. La mineralogía consiste de oligoclasa, ortoclasa, cuarzo, biotita, hornblenda, óxidos de fierro y sericita. Esta unidad intrusiona a las rocas pre-terciarias y su edad es todavía dudosa ya que existen escasos fechamientos en el área con localizaciones poco precisas.

Terciario-Oligoceno (ToTR-R)

La unidad está constituida por toba riolítica, riolita, toba lítica, toba y brecha volcánica de composición dacítica, que sobreyacen a volcánicas Jurásicas, Cretácicas e intrusivo del Paleoceno, y a su vez están cubiertas por rocas sedimentarias continentales y volcánicas del Terciario y Cuaternario. Constituyen afloramientos escasos y aislados localizados al norte de la sierra El Chivato.

Terciario-Mioceno (TmCgp-Ar)

A esta unidad se le conoce con el nombre de Formación Báucarit, y consiste en una secuencia de conglomerados polimícticos con intercalaciones y lentes de arenisca, y en algunas localidades con rocas volcánicas. Esta Formación cubre en discordancia a rocas pre-mioceno, aunque regularmente este contacto es por falla normal, y se encuentra sobreyacido discordantemente por volcánicas riolíticas y conglomerados más jóvenes. En el acuífero aflora en las porciones sur y norte, sobre los márgenes del Río Cuitaca y al suroeste del poblado de Cuitaca.

El conglomerado es de color café claro-crema, en estratos gruesos bien consolidados, con clastos subangulosos y subredondeados de tamaño variable de riolita, granito, andesita y toba andesítica en una matriz arenosa que en ocasiones es tobácea; con lentes y estratos de arenisca de la misma coloración.

Cuaternario (QptCgp, Qhoal)

La unidad Qpt Cgp se encuentra distribuida en la parte central del acuífero. Se constituye de sedimentos continentales de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consisten en grava, arena y limo, que en ocasiones presentan estratificación débilmente marcada. Estos sedimentos se presentan rellenando valles orientados noroeste-sureste y norte-sur, y zonas de pie de monte, cubriendo discordantemente a las rocas más antiguas. Los sedimentos superficiales cuaternarios (Qhoal) se encuentran cubriendo los cauces de ríos y arroyos principales. Consisten de material suelto constituido de grava, arena, limo y arcilla, resultado de la erosión de rocas preexistentes. Estos materiales son transportados por las corrientes fluviales y depositados sobre el cauce de los ríos y en las planicies de inundación.

4.2. Geología estructural

Los elementos estructurales más importantes que se tienen en el área de estudio son familias de fallas y fracturas originadas en su mayoría por la tectónica distensiva. Las manifestaciones estructurales anteriores al Terciario no se aprecian con claridad.

Se tiene un patrón de lineamientos regionales bien marcados con una orientación preferencial NNE-SSW y otro sistema con menor expresión NW-SE, el cual tiene un sistema conjugado de orientación NE-SW en las rocas más buzamientos al noreste y suroeste, produciendo sierras paralelas a la orientación de las fallas. La mayoría de las estructuras corresponden a fallas normales de alto ángulo como resultado un sistema de bloques levantados y hundidos tipo horst y graben, relacionados a la tectónica extensional del Terciario Superior.

El acuífero se aloja en un bajo estructural que está parcialmente relleno por los materiales sedimentarios de denudación estructural de la cuenca.

4.3. Geología del subsuelo

Como parte del estudio realizado en el 2009, se ejecutaron cinco tendidos electromagnéticos (TEM's) en la parte central del acuífero donde se localiza la zona de mayor extracción de aguas subterráneas, es posible definir la presencia de un acuífero constituido en su porción superior por depósitos aluviales y en porción inferior por un conglomerado semiconsolidado a consolidado, que presenta permeabilidad secundaria por fracturamiento. La misma roca fracturada constituye la frontera y basamento hidrogeológico cuando el fracturamiento desaparece. Con la información de los TEM's se construyó una sección geoelectrica que fue correlacionada con la información geológica para definir una sección hidroestratigráfica con rumbo general norte-sur (figura 3).

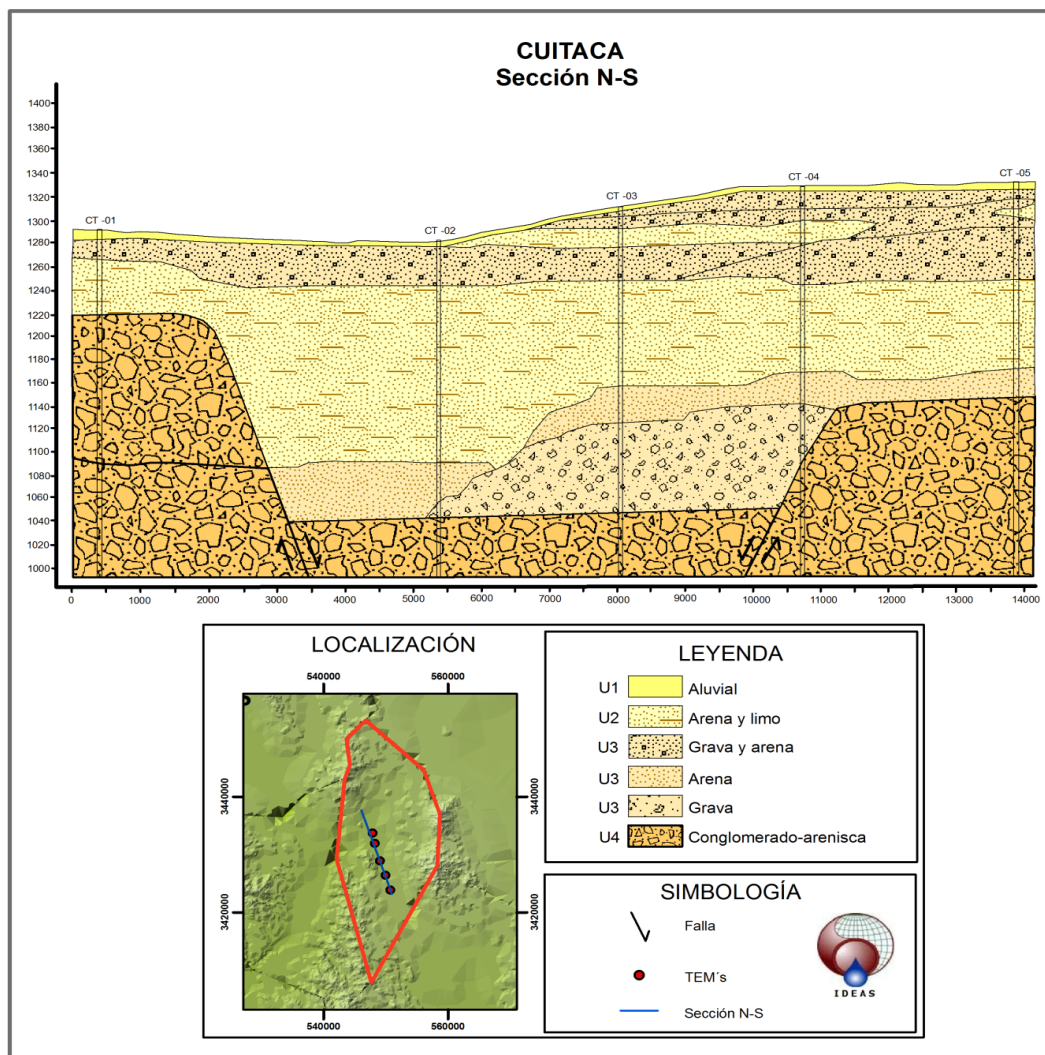


Figura 3. Sección hidrogeológica (IDEAS, 2009)

Se definieron cuatro unidades hidrogeológicas: la unidad I, correspondiente a depósitos aluviales (gravas, arenas y limos) que se encuentran en los arroyos, ríos y planicies de inundación, con un espesor que varía desde centímetros hasta 30 m y puede encontrarse saturada; la unidad II, que

comprende depósitos de arenas y limos con espesores que varían a lo largo de la sección entre 43 m y 133 m, pueden estar saturados, pero se infiere que su permeabilidad es baja; la unidad III, conformada por gravas y arenas saturadas, por lo que se considera con buenas posibilidades acuíferas por su alta permeabilidad; y la unidad IV, donde se presenta un conglomerado-arenisca semiconsolidado a consolidado, que tiene baja permeabilidad y porosidad, con la consecuente baja probabilidad de estar saturada.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero es de **tipo libre** cuando el nivel estático se encuentra en la unidad I y semiconfinado cuando la unidad II actúa como capa semiconfinante. Se encuentra formado en su porción superior por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por boleas, gravas y arenas no consolidadas y de alta permeabilidad, que contienen horizontes de arenas y limos, que pueden formar una capa semiconfinante.

Su explotación se localiza principalmente sobre el cauce de los ríos y arroyos, donde el nivel estático se encuentra a menor profundidad y la permeabilidad es alta. Debajo de esta secuencia, el acuífero está conformado por conglomerados bien semiconsolidados a consolidados, que presentan baja permeabilidad.

5.2. Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los resultados obtenidos en cinco pruebas de bombeo ejecutadas como parte del estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua (2009), los valores de transmisividad (T) varían de 1.46×10^{-2} a $3.23 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que la conductividad hidráulica (K) oscila entre 2.18×10^{-4} y $1.33 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo (CONAGUA, 2009)

POZO	COORDENADAS UTM (NAD 27)		ELEV. (msnm)	GASTO (l/s)	NIVEL ESTÁTICO (m)	NIVEL DINÁMICO (m)	ABAT. (m)	T (m ² /s)	K (m/s)
	X	Y							
CTC-01	551960	3442471	1380	2.5	6.49	14.08	7.59	1.53E-04	2.85E-06
CTC-07	549784	3426383	1305	20	12.93	14.41	1.48	1.46E-02	2.18E-04
CTC-14	550821	3427767	1346	2.2	35.85	51.7	15.85	3.23E-05	1.33E-06
CTC-15	549420	3428503	1283	1.11	5.8	12.72	6.92	4.76E-05	1.39E-06
CTC-16	548798	3429398	1273	6	4.69	5.568	0.878	2.31E-03	9.13E-05

ELEV. = Elevación ABAT. = Abatimiento T= Transmisividad K = Conductividad hidráulica

Los valores más altos de T y K corresponden a los materiales de acarreo que forman al cauce de los arroyos.

5.3. Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores, uno de ellos es la medición de los niveles piezométricos por medio de los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes.

Se cuenta con información piezométrica en forma dispersa para los años 2005 y 2009. La que corresponde al 2009 es la que presenta mayor cobertura espacial y fue la que se utilizó para describir el comportamiento hidráulico.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De la figura 4 se puede observar que los valores de profundidad al nivel estático para el año 2009 varían de 5 a 30 m, incrementándose, por efecto de la topografía, del valle hacia las estribaciones de las sierras que constituyen el límite del acuífero. En la porción central del valle se presentan valores de 30 m, que pueden reflejar el efecto local de la concentración del bombeo.

5.4.2. Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 5), se observa que sus valores muestran claramente el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que no se han producido alteraciones de las condiciones naturales. El flujo subterráneo tiene una dirección preferencial noreste – suroeste en la parte norte y sureste – noroeste en la parte sur, de manera que ambos flujos convergen en la parte central del acuífero para formar un solo flujo con salida hacia el noroeste. Los valores registrados varían desde 1103 hasta 1404 msnm en las partes altas.

5.4.3. Evolución anual del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, existe información dispersa para los años 2005 y 2009, de manera que en total se tienen seis aprovechamientos con información en estos años ubicados a lo largo del cauce principal. Con estos datos se elaboraron las curvas de igual evolución del nivel estático (figura 6), donde se observa que el mayor abatimiento que se presenta en el acuífero es de – 50 m, ubicado en la parte sur; y la mayor recuperación es de 2.2 m, en la parte central.

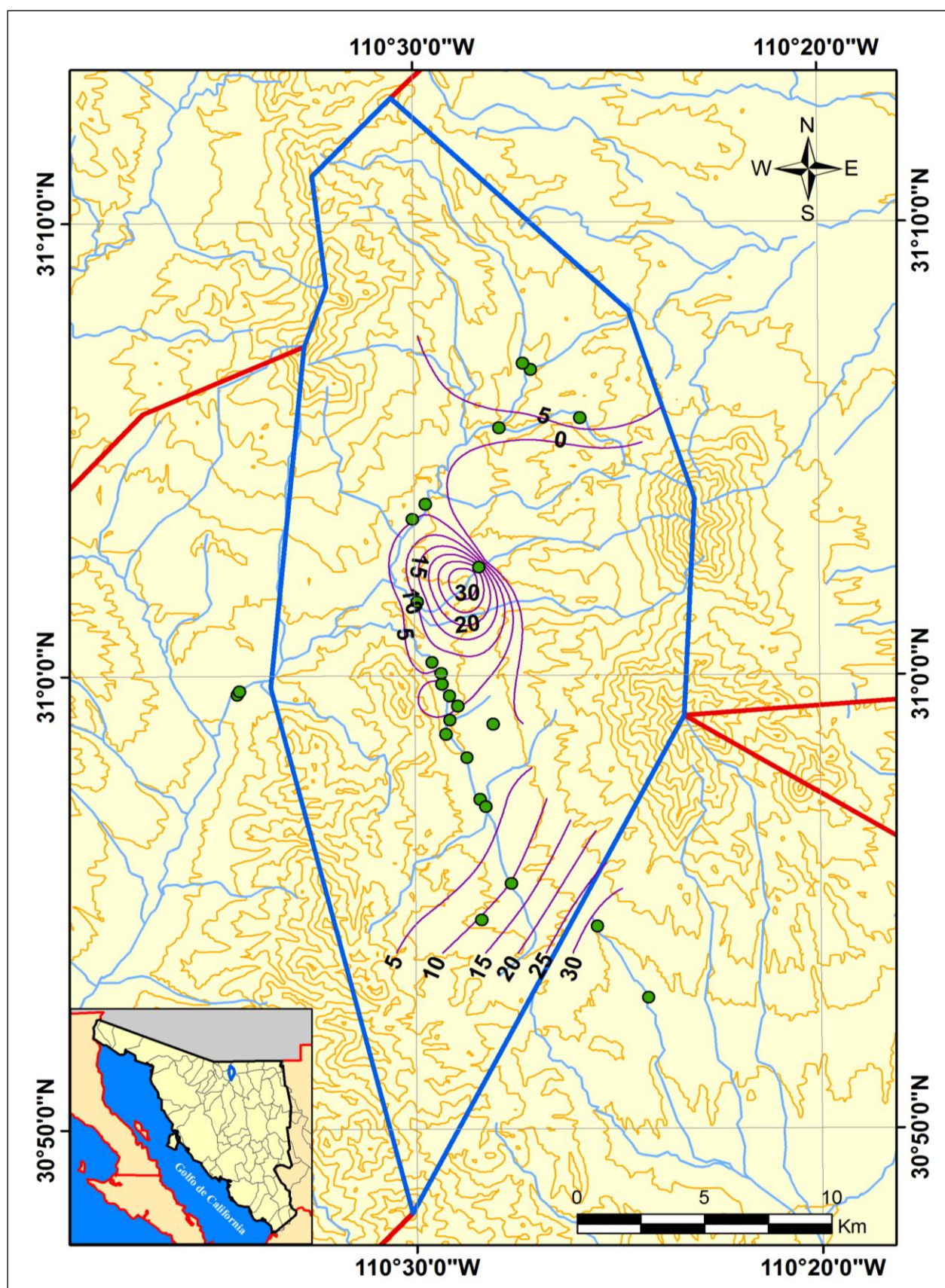


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

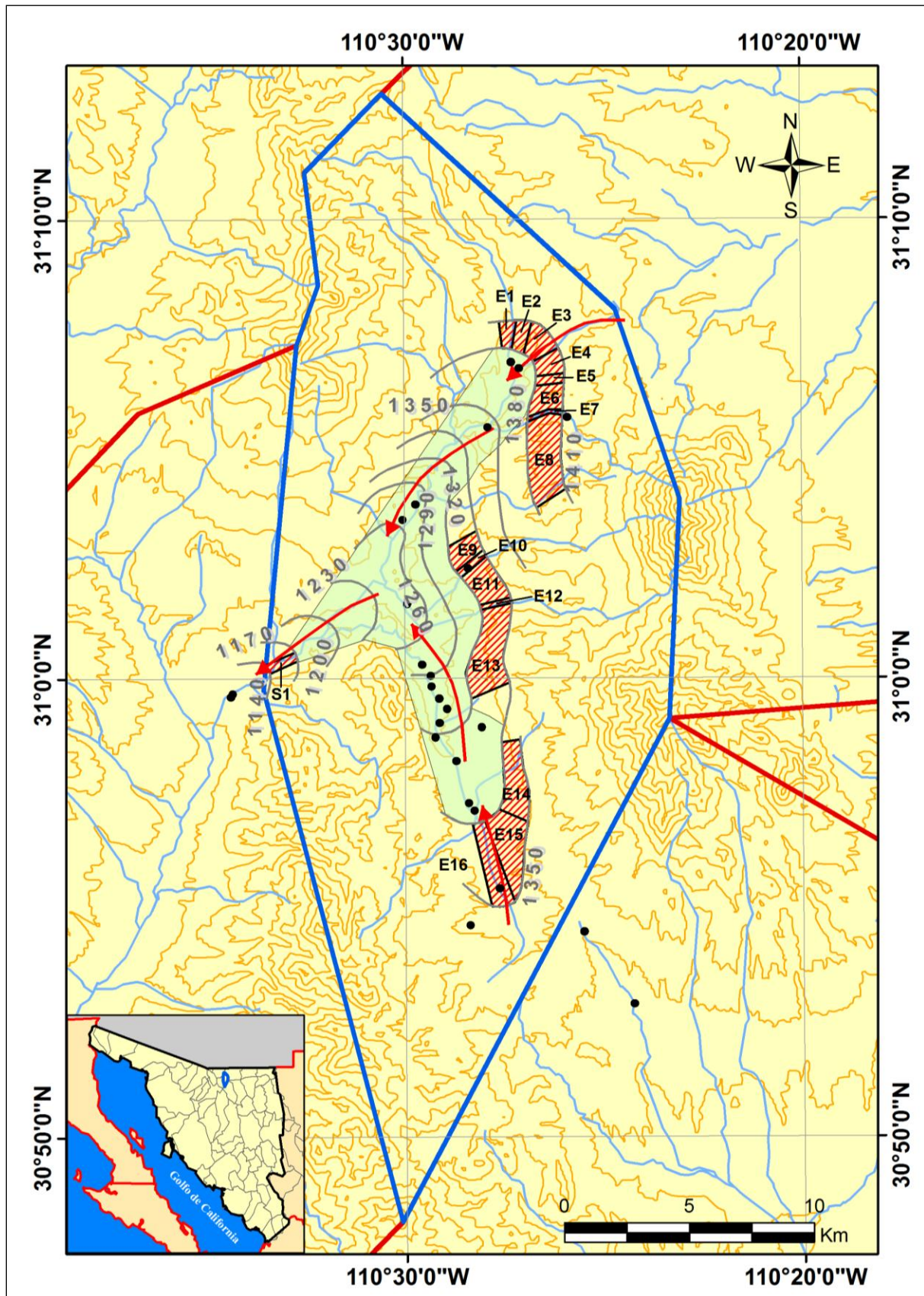


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

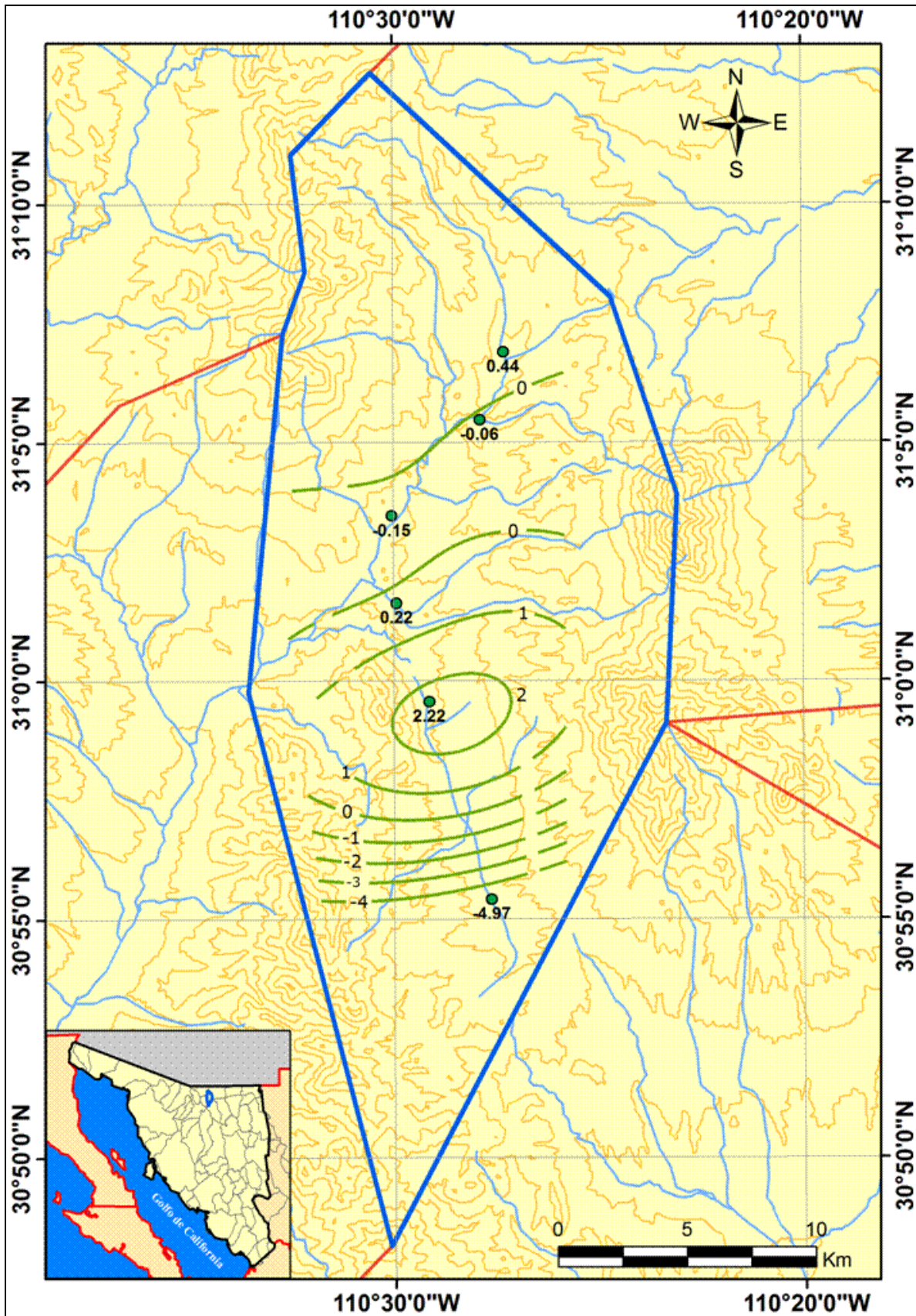


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2005 - 2009)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2009, se tomaron muestras de agua en 10 aprovechamientos y una en la descarga del Arroyo Milpillas, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos.

Tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que con los valores de conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Asociation (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 308 a 544 μ S/cm (figura 7).

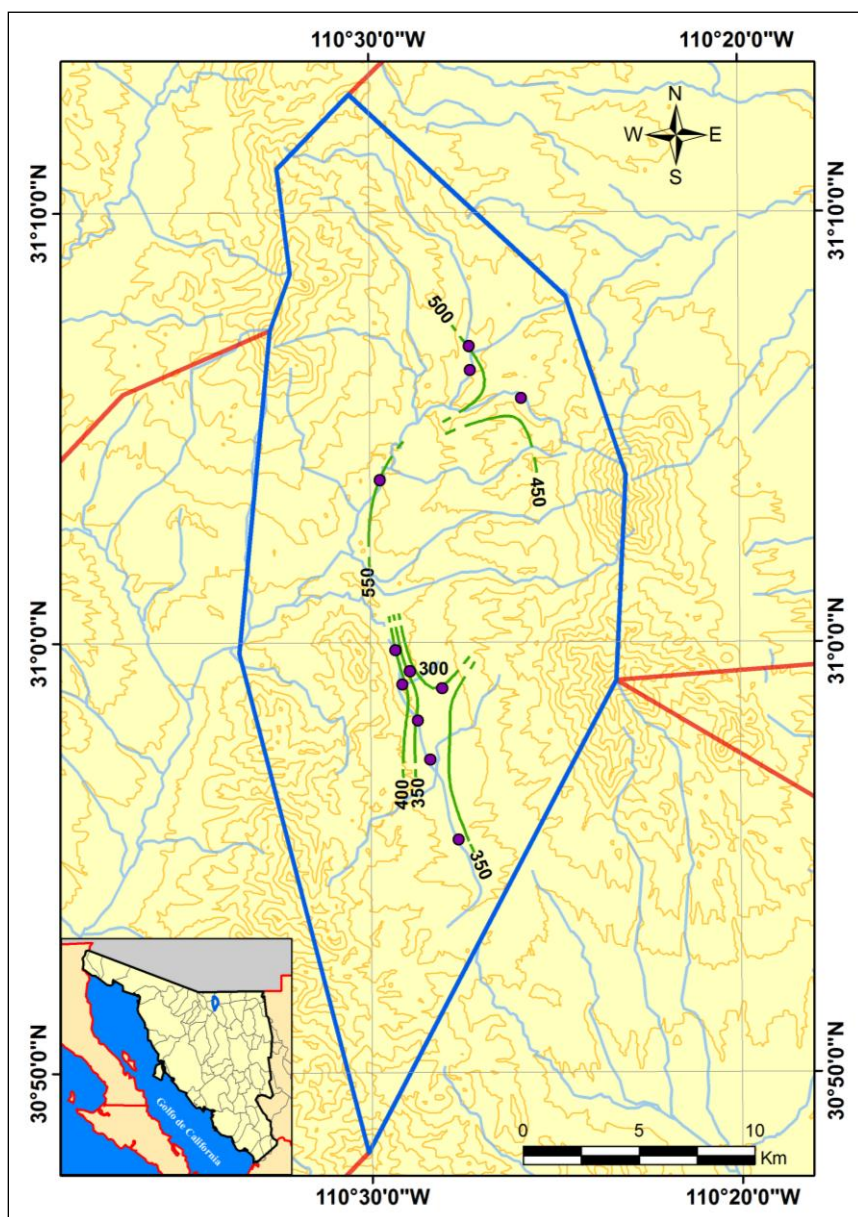


Figura 7. Curvas de isovalores de Conductividad Eléctrica (μ S/cm), 2009

Los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 134 a 244 mg/l como máximo. La representación gráfica de los resultados de los análisis fisicoquímicos (diagramas de Piper y Stiff) refleja que la familia de agua que predomina es Bicarbonatada Cálctica, pues se presenta en 9 de las 10 muestras. Esta familia es representativa de aguas de reciente infiltración.

Los dos aprovechamientos restantes presentan agua Bicarbonatada Sulfatada-Cálctica, que es agua que se encuentra en la fase de transición de intercambio iónico, es decir, en proceso de evolución (figura 8).

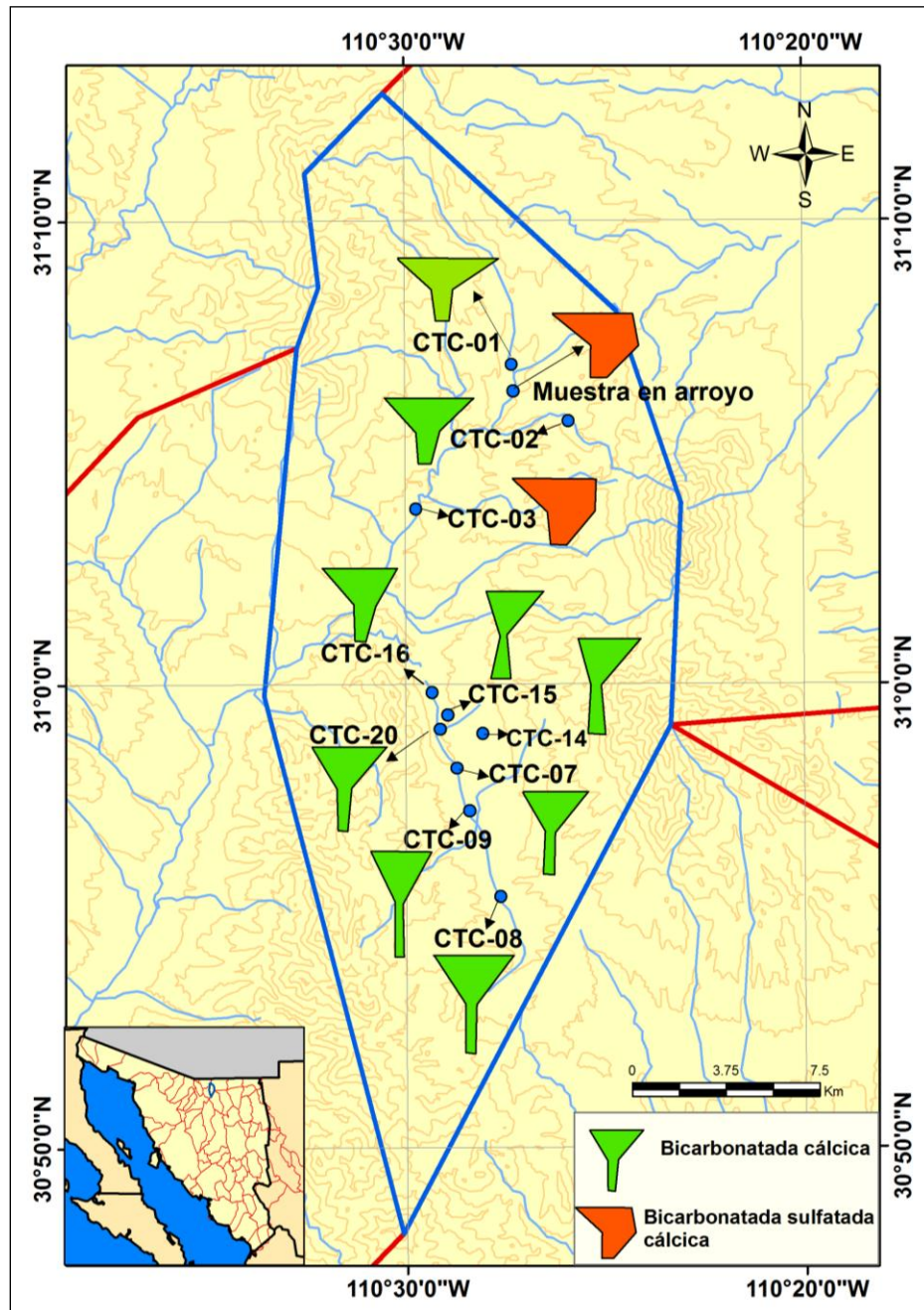


Figura 8. Diagramas de Stiff

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el 2009, existen en el acuífero Cuitaca un total de 21 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 14 son pozos y los 7 restantes norias. Del total de aprovechamientos, 18 se encuentran activos y los 3 restantes inactivos.

El volumen de extracción calculado es de **2.84 hm³ anuales**, de los cuales 1.89 hm³ (66.6 %) se destina al uso industrial (Minera María), 0.45 hm³ (15.8%) al uso agrícola-doméstico; 0.36 hm³ al uso agrícola-pecuario (12.7 %), 0.069 hm³ (2.4%) para uso agrícola, y los 0.071 hm³ restantes (2.5%) satisfacen las necesidades del uso público urbano, doméstico y pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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:

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

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

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

El balance se planteó para el periodo 2005-2009, en una superficie aproximada de 64 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

De esta manera la ecuación de balance propuesta para éste acuífero es la siguiente:

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

Donde:

R_v= Recarga vertical;

E_h= Recarga por flujo horizontal;

B= Bombeo;

S_h= Salidas por flujo horizontal;

ETR= Evapotranspiración real en niveles someros;

ΔV(S)= Cambio en el volumen almacenado;

7.1. Entradas

La recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). En este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida, **$R_i = 0$** .

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1). De esta manera, despejando la recarga vertical se obtiene lo siguiente:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado, mediante la siguiente expresión:

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

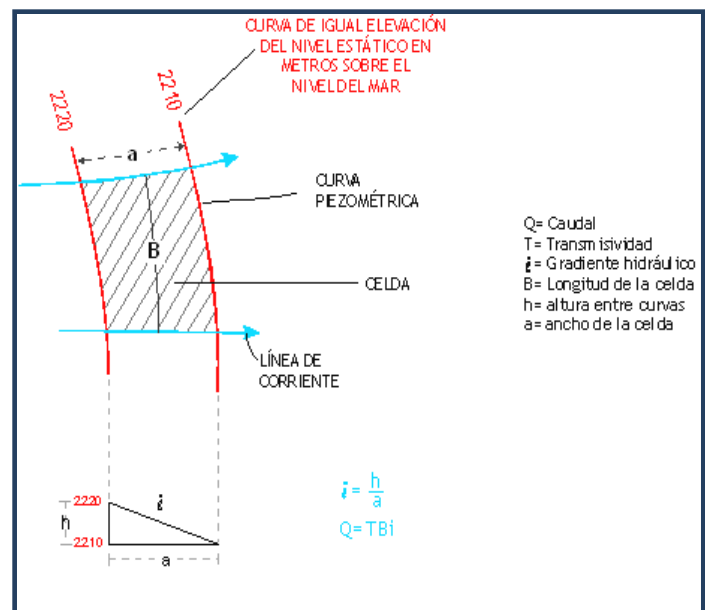
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Para hacer el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de Transmisividad (T). Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas. Los valores de conductividad hidráulica (K) utilizados corresponden al promedio obtenido en las pruebas de bombeo realizadas en el estudio de 2009. En las celdas de entrada se consideró un espesor saturado (b) para las celdas ubicadas en zonas aluviales de 5 m y de 15 m en zonas fluviales, obtenido a partir la sección hidroestratigráfica mostrada en el figura 3.

De acuerdo con la configuración del nivel estático para el año 2009 mostrada en la figura 5, el cálculo del flujo en las celdas de entradas se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	b (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (m ³ /año)
E1	542	1114	5	30	0.0269	1.55E-04	7.75E-04	0.0113	356593
E2	593	1264	15	30	0.0237	1.86E-06	2.79E-05	0.0004	12387
E3	1020	1288	5	30	0.0233	1.55E-04	7.75E-04	0.0184	580634
E4	824	1176	15	30	0.0255	1.86E-06	2.79E-05	0.0006	18493
E5	381	1158	5	30	0.0259	1.55E-04	7.75E-04	0.0076	241009
E6	1012	1303	15	30	0.023	1.86E-06	2.79E-05	0.0007	20513
E7	171	1428	5	30	0.021	1.55E-04	7.75E-04	0.0028	87953
E8	3324	1343	15	30	0.0223	1.86E-06	2.79E-05	0.0021	65323
E9	884	1421	15	30	0.0211	1.86E-06	2.79E-05	0.0005	16426
E10	250	1353	5	30	0.0222	1.55E-04	7.75E-04	0.0043	135622
E11	1616	1243	15	30	0.0241	1.86E-06	2.79E-05	0.0011	34333
E12	181	1272	5	30	0.0236	1.55E-04	7.75E-04	0.0033	104385
E13	3394	1174	15	30	0.0256	1.86E-06	2.79E-05	0.0024	76303
E14	3068	879	15	30	0.0341	1.86E-06	2.79E-05	0.0029	92105
E15	1739	2128	5	30	0.0141	1.86E-06	9.30E-06	0.0002	7189
E16	721	3528	15	30	0.0085	1.55E-04	2.33E-03	0.0142	449299
TOTAL ENTRADAS =									2,298,567

El volumen total de entradas subterráneas horizontales se estima en **2.3 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y evapotranspiración (ETR) en zonas con niveles someros. No existen manantiales ni descarga por flujo base.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **2.8 hm³/año**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático (figura 5) y aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas.

El espesor saturado (b) fue estimado de acuerdo a la información de las secciones hidroestratigráficas. El detalle del cálculo de la celda se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	b (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	309	917	15	30	0.0327	1.55E-04	2.33E-03	0.0235	0.7

El volumen total de salidas por flujo subterráneo se estima en **0.7 hm³/año**.

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

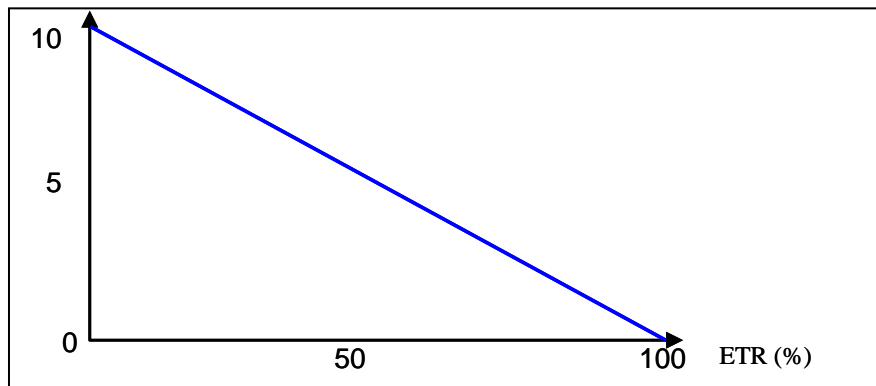
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

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

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

T (°C) =	17.5		
P(mm) =	574.2	P ² = 329705.64	ETR (mm)= 518.6
L =	1005.46875	L ² = 1010967.41	ETR (m)= 0.5186

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



A lo largo de los arroyos que se encuentran en la parte central del acuífero, el nivel estático se encuentra a una profundidad media de 6 m y se tiene la presencia de vegetación nativa. La evapotranspiración en las zonas con niveles someros, se calcula como una fracción de la lámina de evapotranspiración para el acuífero (518.6 mm), la cual varía en forma inversa a la profundidad, hasta una profundidad máxima de 10 m. El detalle del cálculo se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de evapotranspiración en niveles someros

Intervalo curvas (m)	Profundidad media (m)	Área (km ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (hm ³ /año)
0 a 1	0.5	1.1	0.95	0.5186	0.5
1 a 2	1.5	0.7	0.85	0.5186	0.3
2 a 3	2.5	0.5	0.75	0.5186	0.2
3 a 4	3.5	1.4	0.65	0.5186	0.5
4 a 5	4.5	1.7	0.55	0.5186	0.5
5 a 6	5.5	1.5	0.45	0.5186	0.3
6 a 7	6.5	7.1	0.35	0.5186	1.3
				TOTAL	3.6

El volumen total de salida por evapotranspiración asciende a **3.6 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

El cambio de almacenamiento representa el volumen ganado o drenado por acuífero y se calcula a partir de la evolución piezométrica observada en el área de balance y del coeficiente de almacenamiento, mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Delta V = S * A * h$$

Donde:

ΔV = Volumen de cambio de almacenamiento;

S = Coeficiente de almacenamiento;

A = Área entre curvas de igual evolución del nivel estático;

h = Valor medio de la variación piezométrica en el periodo;

Para este caso, de acuerdo al manual para evaluar recursos hídricos subterráneos (1994) se considera un valor de $S = 0.1$, dado que el depósito aluvial está constituido por gravas y arenas. El volumen que ha ganado el acuífero para el periodo 2005 – 2009 es de 064 hm^3 (tabla 6), por lo que el promedio para el periodo es de **0.2 hm^3 anuales**.

Tabla 6. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2005-2009)

Evolución (m)	Área (km ²)	S	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
2	2.3	0.1	0.50
1.5	2.9	0.1	0.40
0.5	11.1	0.1	0.60
-0.5	0.7	0.1	-0.04
-1.5	0.5	0.1	-0.08
-2.5	0.5	0.1	-0.12
-3.5	0.5	0.1	-0.18
-5.5	0.4	0.1	-0.22
-4.5	0.5	0.1	-0.22
Total =			0.64
Promedio anual =			0.16

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (R_v), que se calcula mediante la ecuación (2), por lo que se tiene:

$$R_v = Sh + B + ETR + \Delta V(S) - Eh \quad (2)$$

$$R_v = 0.7 + 2.8 + 3.6 + 0.2 - 2.3$$

$$R_v = 5.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$\begin{aligned}R_t &= R_v + E_h \\R_t &= 5.0 + 2.3 \\R_t &= 7.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

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 siguiente expresión:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

R_t= 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 (R_t)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R_t), 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 de **7.3 hm³/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 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. Como descarga natural comprometida, se considera el volumen de salidas horizontales que es de **0.7 hm³ anuales**, hacia el acuífero Cocóspera.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (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 General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2010, es de 980,000 m³/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.

$$\text{DAS} = R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \quad (3)$$

$$\text{DAS} = 7.3 - 0.7 - 0.980000$$

$$\text{DAS} = 5.620000 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **5'620,000 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto su 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 su 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. BIBLIOGRAFIA

CONAGUA, 2005. Elaboración de Atlas de aguas subterráneas para el Estado de Sonora y diseño de una red de monitoreo piezométrico. Realizado por la Universidad de Sonora.

CONAGUA, 2009. Actualización geohidrológica de los acuíferos Los Vidrios, Río Alisos, Arroyo Sahuaro, Sahuaral y Cuitaca. Realizado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS).