

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Arroyo Sahuaro (2604),  
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							
2604	ARROYO SAHUARO	10.9	3.3	9.551045	4.3	0.000000	-1.951045

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 2604 ARROYO SAHUARO, ESTADO DE  
SONORA***

***México, D.F. Marzo de 2010***

## 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 .....	5
3.1.	Provincia fisiográfica .....	5
3.2.	Clima.....	6
3.3.	Hidrografía .....	6
3.4.	Geomorfología .....	7
4.	GEOLOGÍA .....	7
4.1.	Estratigrafía.....	8
4.2.	Geología estructural .....	12
4.3.	Geología del subsuelo .....	13
5.	HIDROGEOLOGÍA .....	14
5.1.	Tipo de acuífero .....	14
5.2.	Parámetros hidráulicos .....	14
5.3.	Piezometría.....	15
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1.	Profundidad al nivel estático .....	15
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	17
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	18
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....	19
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	19
7.1.	Entradas.....	20
7.1.1.	Recarga vertical (Rv) .....	20
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	20
7.2.	Salidas .....	21
7.2.1.	Bombeo (B).....	22
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	22
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	22
8.	DISPONIBILIDAD .....	23
8.1.	Recarga total media anual (Rt).....	23
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM) .....	23
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) .....	24
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS).....	24
9.	BIBLIOGRAFIA .....	25

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 (REPD).

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 Arroyo Sahuaro, definido con la clave 2604 del Sistema de Información Geográfica para el manejo del Agua Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza al noroeste del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 30° 56' y 31° 30' de latitud norte y 112° 21' y 113° 18' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 3051 km<sup>2</sup>.

Colinda al oeste con el Golfo de California; al norte colinda con el acuífero Sonoyta-Puerto Peñasco y al sur con el acuífero Caborca, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente comprende parte de los municipios de Caborca, Puerto Peñasco y General Plutarco Elías Calles (Sonoyta).

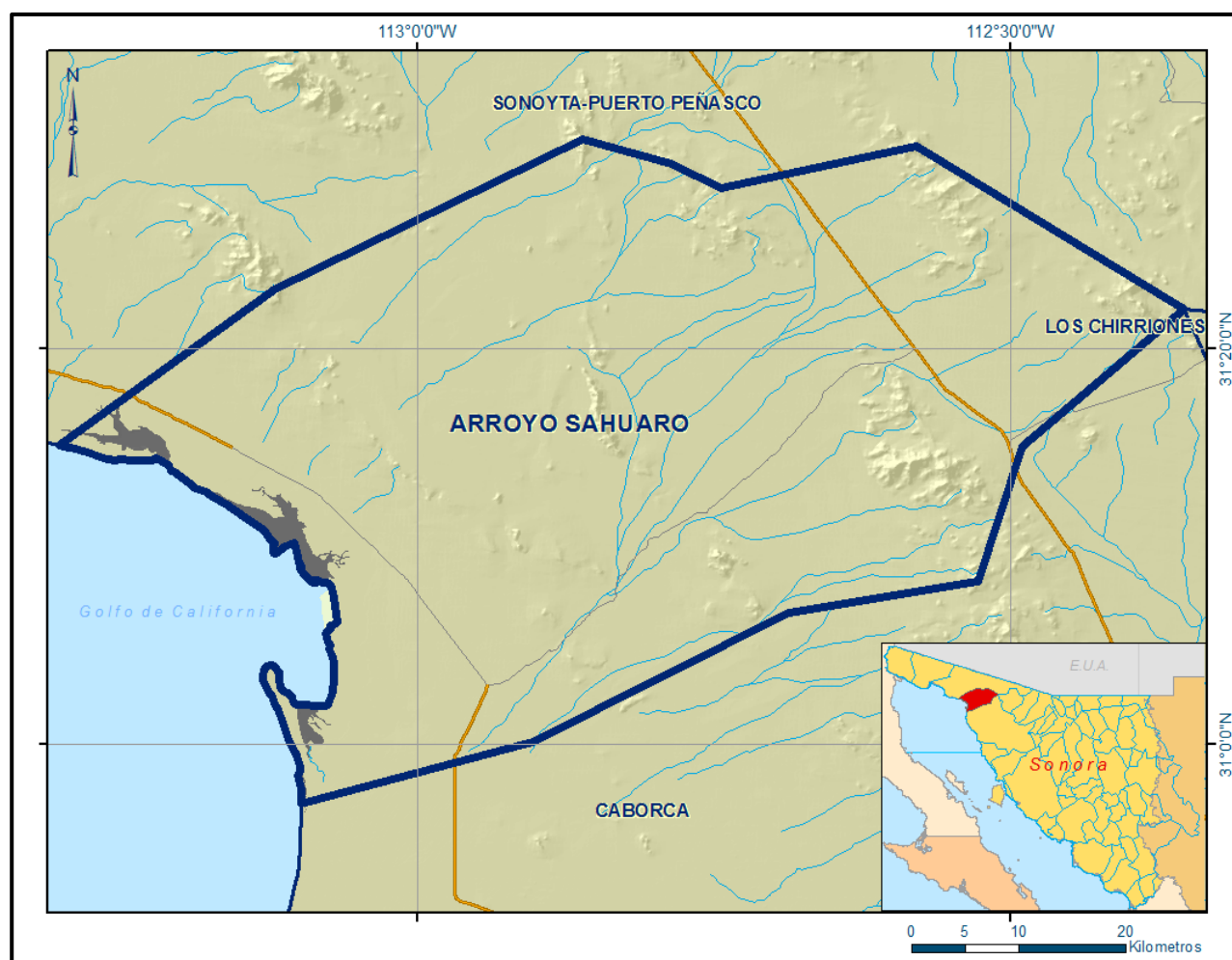


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUÍFERO 2604 ARROYO SAHUARO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	112	21	15.8	31	22	0.0	
2	112	29	24.8	31	15	3.0	
3	112	31	37.6	31	8	13.4	
4	112	41	15.1	31	6	38.6	
5	112	54	11.8	31	0	6.9	
6	113	5	52.3	30	56	57.9	del 6 al 7 por la línea de bajamar a lo largo de la costa
7	113	18	8.0	31	15	5.2	
8	113	7	15.5	31	22	59.2	
9	112	51	40.6	31	30	33.7	
10	112	47	12.5	31	29	18.5	
11	112	44	38.5	31	28	5.4	
12	112	34	45.3	31	30	11.9	
1	112	21	15.8	31	22	0.0	

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Arroyo Sahuaro pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda. La porción sur del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la Región Altar, Pitiquito y Caborca, Estado de Sonora”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 18 de octubre de 1962. Este decreto es de tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La porción norte del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del *“Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona conocida como Sonoita, Sonora”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de abril de 1976. Este decreto es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite la extracción para usos domésticos.

La porción central del acuífero por el *decreto que 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* (parte oeste del meridiano 110° de Greenwich), publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de septiembre de 1978. Este decreto es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite la extracción para usos domésticos.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas de 2010, los municipios de Caborca, Puerto Peñasco y General Plutarco Elías Calles se localizan en la zona de disponibilidad 4. El usuario principal del agua es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguno, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el 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:

**ESTUDIOS BÁSICOS Y PROYECTOS PARA EL DESARROLLO AGROPECUARIO DE LA REGIÓN SAHUARO-COSTA RICA, SONORA. PRIMERA ETAPA**, elaborado por la empresa **Planeación, Sistemas y Control, S. A. de C. V.**, para la Comisión Nacional del Agua, en 1992. Incluye la ejecución de sondeos eléctricos verticales, análisis hidrológico, nivelación de brocales, levantamientos topográficos, etc. Las conclusiones más importantes generadas en el estudio son las avenidas resultantes de las fórmulas empíricas corresponden a ríos caudalosos con cauces bien definidos y bajo condiciones climáticas muy lluviosas se acercan sensiblemente a periodos de retorno entre 100 y 500 años y el método empírico del Soil Conservation Service arroja un resultado más adecuado a las condiciones del proyecto (114.9 m<sup>3</sup>/s), próximo al dato observado sobre el Río

Sonoyta ( $273 \text{ m}^3/\text{s}$ ),  $A_c = 5221 \text{ km}^2$ . En la región de Caborca, se autorizó la construcción de un pozo para uso doméstico y de abrevadero en cada uno de los ejidos y un caudal de 150 lps para uso agrícola en el ejido Juan Álvarez.

**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 del Organismo de Cuenca Noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. Aparte 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, 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.

La información geofísica del primer estudio y las bases de datos del segundo, así como la información general, climatológica, piezométrica e hidrogeoquímica del último, constituyen la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se mencionan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia fisiográfica**

Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el área se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Llanura Sonorense dentro de las subprovincias Desierto de Altar y Sierras y Llanuras Sonorenses (Manuel Álvarez Jr., 1958).

Las principales formas fisiográficas que se presentan en el acuífero, son: *llanuras, grandes bajadas con lomerío y sierras escarpadas*, que cubren el 50%, 37% y 11% respectivamente, del área total del acuífero. Otras fisioformas de menor extensión son los *lomeríos complejos, campos de dunas y playas*, que cubren el 2% del área restante.



### **3.2. Clima**

El clima que prevalece en la región según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, es el BWhw(x'), que corresponde a un clima muy seco con lluvias en verano, semi-cálido con un invierno fresco y presencia de lluvia invernal; es decir, la que ocurre en los primeros meses del año y ésta supera los 10.2 mm. La temperatura media anual es mayor a los 18°C.

Para el análisis climatológico, se consideró la información de cuatro estaciones climatológicas, todas ellas administradas por la Comisión Nacional del Agua: Sonoyta, Puerto Peñasco, Pitiquito y Altar.

La temperatura media en las estaciones no presenta grandes variaciones, ya que la media anual máxima se registra en la estación Puerto Peñasco, en la región costera, con 22.5°C, mientras que la media mínima es de 21.4°C, en Sonoyta. La temperatura media anual en todo el acuífero es de 22.0°C.

La temperatura media máxima se registra en los meses de julio y agosto, con 10.5°C y 10.6°C, respectivamente, mientras que las temperaturas medias mínimas se presentan en los meses de diciembre y enero, con 4.4°C y 4.3°C.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia: uno de julio a septiembre correspondiente a la temporada de verano y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas por los frentes fríos que afectan la región.

Con base en el análisis climatológico se obtuvo una lámina de precipitación media anual de 135.0 mm para el acuífero. La mayor lámina se presenta en el mes de septiembre con un valor de 23.0 mm. Considerando la ocurrencia de la lluvia en cada una de las estaciones analizadas, en Pitiquito se registra el valor medio máximo, con 251.9 mm anuales, seguido por la estación Sonoyta con 200.6 mm y Puerto Peñasco, que registra la precipitación media mínima de 61.2 mm anuales.

Los valores correspondientes a la evaporación potencial son elevados debido a las condiciones climatológicas de la región. Los valores más altos se registran en Sonoyta, con una evaporación media anual de 2,642.6 mm, seguida por Pitiquito con 2,566.3 mm, y la estación Puerto Peñasco, con 2,211.8 mm anuales. La evaporación potencial media anual en el acuífero es de 2,428.2 mm.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero Arroyo Sahuaro se encuentra en la Región Hidrológica 8 Sonora Norte, dentro de la cuenca del Río Sonoyta (C) y subcuenca Costa Rica (d). En el acuífero prevalecen condiciones

extremas de aridez con grandes extensiones cubiertas de arenas, donde los cauces de las corrientes no están bien definidos y sus escurrimientos superficiales son prácticamente nulos. Al presentarse las escasas precipitaciones, el agua escurre en las partes bajas formando diferentes cauces e infiltrándose en las arenas del desierto, por lo que el agua llega excepcionalmente al Golfo de California en volúmenes reducidos.

### **3.4. Geomorfología**

De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo *et al.*, 1990), el área se caracteriza por presentar cuatro geoformas: ladera montañosa, lomeríos, pie de monte y planicies, las cuales están clasificadas con base en su forma, altura, pendiente, litología y edad. Las planicies predominan en más del 90% de la superficie del acuífero de manera que su topografía es suave, con pendiente general uniforme hacia el suroeste. Las principales formaciones montañosas dentro de la cuenca tienen altitudes comprendidas entre 400 y 1,200 m. Las pendientes fuertes se presentan en la cercanía de los afloramientos de las rocas intrusivas.

## **4. GEOLOGÍA**

Las características geológicas y estructurales presentes en el noroeste de Sonora, particularmente en la región del Desierto de Altar, determinan una evolución tectónica que está dada por un conjunto de eventos magmático-estructurales que han operado continuamente desde el Jurásico Tardío hasta el reciente (Staude y Barton 2001), que dejan clara una serie de eventos sobrepuestos cuya resultante principal es una fuerte dispersión de afloramientos orientados NW-SE que dan lugar a la morfología típica de la Provincia Fisiográfica Llanuras Sonorenses y de la Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

El orden de ocurrencia de estos eventos, no permite definir con claridad la tectónica anterior al Cretácico, sin embargo, muchos autores han logrado poner en evidencia la ocurrencia de dos grandes bloques Proterozoicos yuxtapuestos durante el Jurásico mediante un sistema de estructuras corticales de movimientos transpresivos sinestrales de grandes desplazamientos laterales conocido como *Megacizalla Mojave-Sonora* (Anderson & Silver 2005, y referencias incluidas), cuya influencia estructural muestra una traza continua desde Sonora Central hasta el oeste de Arizona. Posiblemente estos desplazamientos corticales dan origen a la configuración actual dispersa del basamento Proterozoico, registrado en diversas partes del Estado mediante cuerpos ígneo-metamórficos segmentados (zócalo estructural) y secuencias sedimentarias marinas detrítico-carbonatadas (cobertura estructural), también del Proterozoico (Rodríguez-Castañeda 1984; Longoria *et al.* 1978).

La reciente controversia generada por tratar de demostrar la existencia de la *Megacizalla Mojave-Sonora* (Silver & Anderson 1974; Anderson & Silver 2005, y referencias incluidas) ha generado una gran cantidad de trabajos descriptivos y geocronológicos que a su vez ha llevado a la comprobación

de dos basamentos estructuralmente yuxtapuestos: El Complejo Metamórfico del este, que corresponde al bloque Norteamérica y El Complejo Metamórfico del oeste, que corresponde con el bloque Caborca (Anderson & Silver 1979). Ambos están conformados por rocas metaplutónicas del Paleo proterozoico, las cuales ocurren como gneises y esquistos que presentan grados metamórficos de facies anfibolita, aunque sus protolitos y edades de metamorfismo son distintos (Nourse et al. 2005). El límite entre ambos basamentos está trazado al este del Cerro Las Norias. Esta estructura regional es de gran importancia, ya que modifica la composición y estructura del basamento y puede dar lugar a fuertes heterogeneidades estructurales y litológicas que afecten el comportamiento del acuífero generando parteaguas subterráneos.

#### **4.1. Estratigrafía**

El acuífero Arroyo Sahuaro cuenta con 20 unidades litoestratigráficas que varían en edad del Proterozoico al Cuaternario (reciente) y están representadas por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, así como amplias planicies aluviales y ambientes costeros que forman depósitos sedimentarios de distinto origen (figura 2).

##### ***Proterozoico Inferior-Medio***

Está representado por augengneises con grados de metamorfismo de facies anfibolita y esquistos micáceos cortados por diques aplíticos y dioríticos (pTmGn-E). Estas unidades están cortadas por intrusivos anorogénicos que poseen edades K-Ar de 1,450 Ma (Anderson y Roldán-Quintana 1979). Se caracterizan por tener una composición que varía de granito a granodiorita de feldespato potásico y mostrar un metamorfismo que genera una foliación moderada (pTmGr). La relación de corte con los gneises y esquistos del Proterozoico Inferior-Medio se observa al sur de Sierra Prieta. Aunque los ambientes genéticos de todas las unidades que componen este basamento han sido determinadas (Iriondo 2001; Anderson y Silver 2005), la actual disposición de los afloramientos está fuertemente controlada por la tectónica distensiva del Basin and Range. Sin embargo, su distribución delimita con cierta exactitud la traza de la Megacizalla Mojave-Sonora. Al sur de ésta ocurren afloramientos de rocas antiguas, mientras que al norte son escasos y/o son unidades más recientes. También es definida por la presencia de las masas ígneas del Jurásico.

##### ***Cámbrico***

Representando la cobertura estructural de las unidades metamórficas del Proterozoico, ocurren secuencias carbonatadas del Cámbrico que forman afloramientos aislados y poco extensos caracterizados por una alternancia de calizas, dolomías y areniscas ortocuarcitas (CimCz-Ar). Por lo general se encuentran plegadas y su base estratigráfica es estructural (cabalgaduras) con las secuencias ígneo-metamórficas del Proterozoico. Esta unidad posee afloramientos dispersos ubicados al sureste de Sierra Prieta, sin embargo al este del área del acuífero la unidad se vuelve mucho más abundante y con afloramientos que muestran secuencias litológicamente mejor conservadas. Estas secuencias del Cámbrico han sido intensamente estudiadas debido a que su

contenido fósil en ocasiones contiene las formas de vida que posiblemente pertenezcan al Pre-Cámbrico.

### ***Jurásico Inferior***

Esta unidad está representada por areniscas y limolitas fuertemente deformadas (JiAr-Lm) que son correlacionables con la Formación San Antonio (González 1980), la cual aflora principalmente al norte y al suroeste de Caborca. Sus afloramientos son muy escasos; ocurren solamente al sureste de los límites del acuífero y por el modo de ocurrencia no es muy clara la relación de contacto con las unidades con que se relaciona.

### ***Jurásico Medio-Jurásico Superior***

Asociada a los procesos de subducción, ocurre una unidad ligeramente metamórfica compuesta por unidades metavolcánicas y metasedimentarias. Se compone de rocas coherentes y piroclásticas de composición riolítica, dacítica y andesítica intercaladas con metareniscas y metaconglomerados (Jm?MV-MS), todas del Jurásico Medio-Superior con edades U-Pb (Iriondo 2001; Anderson y Roldán-Quintana 1979). Estas unidades afloran ampliamente al sureste del acuífero en el Cerro Las Norias. Poseen un intenso plegamiento, foliación y fallamiento del rumbo NW-SE, y cuentan con abundantes recursos minerales, albergando una gran cantidad de zonas de alteración y mineralización, contexto típico de rocas asociadas a subducción.

En relación cortante intrusiva sobre las unidades metavolcánicas y metasedimentarias ocurren cuerpos intrusivos del Jurásico Medio de composición granítica (JmGr) que ocurren mayormente en la Sierra La Espuma y en afloramientos dispersos. Estos cuerpos fueron datados Stewart et al.(1984) e Iriondo (2001) en 177 y 165 Ma, respectivamente.

De forma aislada, al sur del acuífero ocurren cuerpos intrusivos del Jurásico Superior (JsGr-Gd) de composición mineralógica similar a los intrusivos del jurásico Medio pero que posee edades radiométricas de 153 Ma (Stewart *et al.* 1984). A pesar de la fuerte dispersión de afloramientos, sirve como posible criterio para poder correlacionar ambas unidades a un mismo evento tectonomagmático.

### ***Cretácico Superior-Paleógeno***

Hacia el centro-este, norte y sur de los límites del acuífero Arroyo Sahuaro afloran masas ígneas del Cretácico Superior-Paleógeno (KsTpaGr-Gd) que constan de rocas de composición granítica-granodiorítica fechadas entre 97 y 67 Ma por los métodos U-Pb y K-Ar (Anderson y Silver 1974; Iriondo 2001). Ocurren en relación cortante intrusiva con las secuencias Proterozoicas y con las unidades del Jurásico, además también se encuentran segmentadas por los sistemas estructurales del *Basin and Range*, por lo que su cronología relativa de eventos tectónicos les define claramente. La composición mineralógica de estas unidades plutónicas son las típicas encontradas en la mayoría

del Estado, de manera que pueden asociarse directamente al evento de subducción, además de que las edades radiométricas también son consistentes.

### ***Paleógeno***

Dentro del área que abarca el acuífero el Paleógeno está representado en su mayoría por rocas ígneas volcánicas e intrusivas. Los cuerpos intrusivos están representados por granitos de dos micas (muscovita + biotita) y granate, los cuales ocurren con afloramientos de considerable dimensión (TeGr) principalmente al oeste del área y cortando las unidades ígneo-metamórficas del Proterozoico. Sin embargo en algunos lugares parecen estar en contacto estructural mediante fallas de alto ángulo.

Aunque no poseen una aparente relación genética, durante el Eoceno-Oligoceno es depositada una secuencia de rocas piroclásticas y coherentes de composición andesítica (TeoA-TA) que son reportadas en la cartografía del Servicio Geológico Mexicano, que ocurre al sur de los límites del acuífero con afloramientos muy dispersos y de poca extensión.

### ***Mioceno***

Sobreyaciendo discordantemente a las unidades intrusivas de la región y en afloramientos dispersos se encuentran unidades volcánicas del Mioceno (TmA-B, TmR-Rd, TmTR-R) que mayormente ocurren al este de los límites del acuífero. Estas unidades se caracterizan por su diferente composición y naturaleza, con edades K-Ar entre 14 y 12.7 Ma (Gastil et al. 1979) lo que permite inferir que pertenecen a un mismo evento tectonomagmático (Vidal Solano 2005). Estas unidades ocurren en forma de mesetas basculadas, poniendo en evidencia que fueron anteriores a la tectónica distensiva. Se presentan discordantes sobre el basamento cristalino ígneo-metamórfico y es evidente que su emplazamiento fue favorecido por estructuras ya que en general, los afloramientos de estas unidades volcánicas están restringidos a los márgenes de las sierras. Cuando estas unidades ocurren en los amplios valles formados por las planicies aluviales, siempre afloran linealmente de tal forma que es posible que representen estructuras cubiertas por los sedimentos recientes.

### ***Cuaternario, Pleistoceno y Holoceno***

Las unidades consideradas del Cuaternario han sido catalogadas en diversos tipos según el ambiente genético sedimentario en el que fueron depositadas.

La unidad QptCgp, se desarrolla en los piedemonte de manera regular, y se componen de conglomerados-brecha granulométricamente mal clasificados cuya composición varía según la zona de la cual derivan. Por lo general, se forman por procesos de intemperismo mecánico ocasionado por las temperaturas extremas y el viento.

La unidad Qptgv-ar se conforma por sedimentos conglomeráticos no consolidados que ocurren principalmente hacia el sur del acuífero. Se relaciona más a las zonas de llanura costera y por lo

general su ambiente de depósito es aluvial-fluvial, por lo que su granulometría es moderadamente bien clasificada con clastos redondeados. Ya que su ambiente aluvial-fluvial no permite el desarrollo de mineralogía autigénica, esta unidad no posee cementante.

La unidad Qhoar-Im ocurre principalmente en las llanuras intermontanas y en las planicies costeras. Aunque su distribución es muy amplia, su ambiente de depósito no es muy claro ya que puede corresponder con depósitos aluviales-fluviales o puede corresponder con unidades formadas en su totalidad por procesos aluviales, siendo en este último caso, solo una remoción de material sedimentario por cualquier agente erosivo y de transporte.

Por las características climáticas de la región, la unidad Qhoeo representa la actividad eólica resultante del medio árido-desértico. Una de las principales formas de actividad erosiva de las zonas desérticas es la presencia de dunas y mantos de arena granulométricamente bien clasificada que puede llegar a formar amplias zonas. Dado su origen genético, su distribución está controlada por la capacidad de transporte del viento, lo cual causa que sean móviles. El espesor de esta unidad puede variar desde unos cuantos metros, hasta algunas decenas, sin embargo, es posible que llegue a formas de algunas centenas.

Hacia la parte oeste y suroeste del acuífero, ocurren sedimentos depositados en ambientes lacustres que determinan la unidad Qhola, y que se constituye de sedimentos finos (limos y arcillas) con estratificación laminar y limitados a pequeñas cuencas cerradas distribuidas paralelamente o sobre la línea de costa. Probablemente se deban a zonas de baja permeabilidad que permiten el almacenamiento de agua superficial ya sea estacionalmente o de forma casi permanente, cuya disposición está parcialmente controlada por la interacción mar-continente. Pueden representar lugares de descarga subterránea o superficial de agua dulce.

La unidad Qhopa constituye las zonas de interacción agua dulce-agua salada para dar lugar al desarrollo de zonas de manglares y lugares en los que la vegetación y la fauna están muy bien desarrolladas. Por lo general son sedimentos muy finos cuya abundancia de organismos hace que sean sedimentos carbonosos y ricos en fragmentos fósiles. Por su ambiente de depósito, se restringen únicamente a la línea de costa. Pueden representar lugares de descarga subterránea o superficial de agua dulce.

La unidad Qholi representa ambientes típicamente costeros (de litoral) que principalmente se genera por la actividad marítima de oleaje y marea, siendo el medio causante de la formación de barras de arena y demás geoformas típicas de estos ambientes. Sus sedimentos se constituyen de arenas y limos que por su fácil arrastre y transporte pueden ser constantemente modificados.

La unidad Qhoal representa al material aluvial típico que puede encontrarse como sedimentos de arroyos y que solamente representa sedimentos en proceso de transporte fluvial.

Aunque existen una gran cantidad de ambientes sedimentarios, por la abundante intensidad de los procesos eólicos, todas las unidades anteriormente mencionadas pueden estar sujetas a procesos de transporte eólico, siendo el proceso sedimentario más dominante.

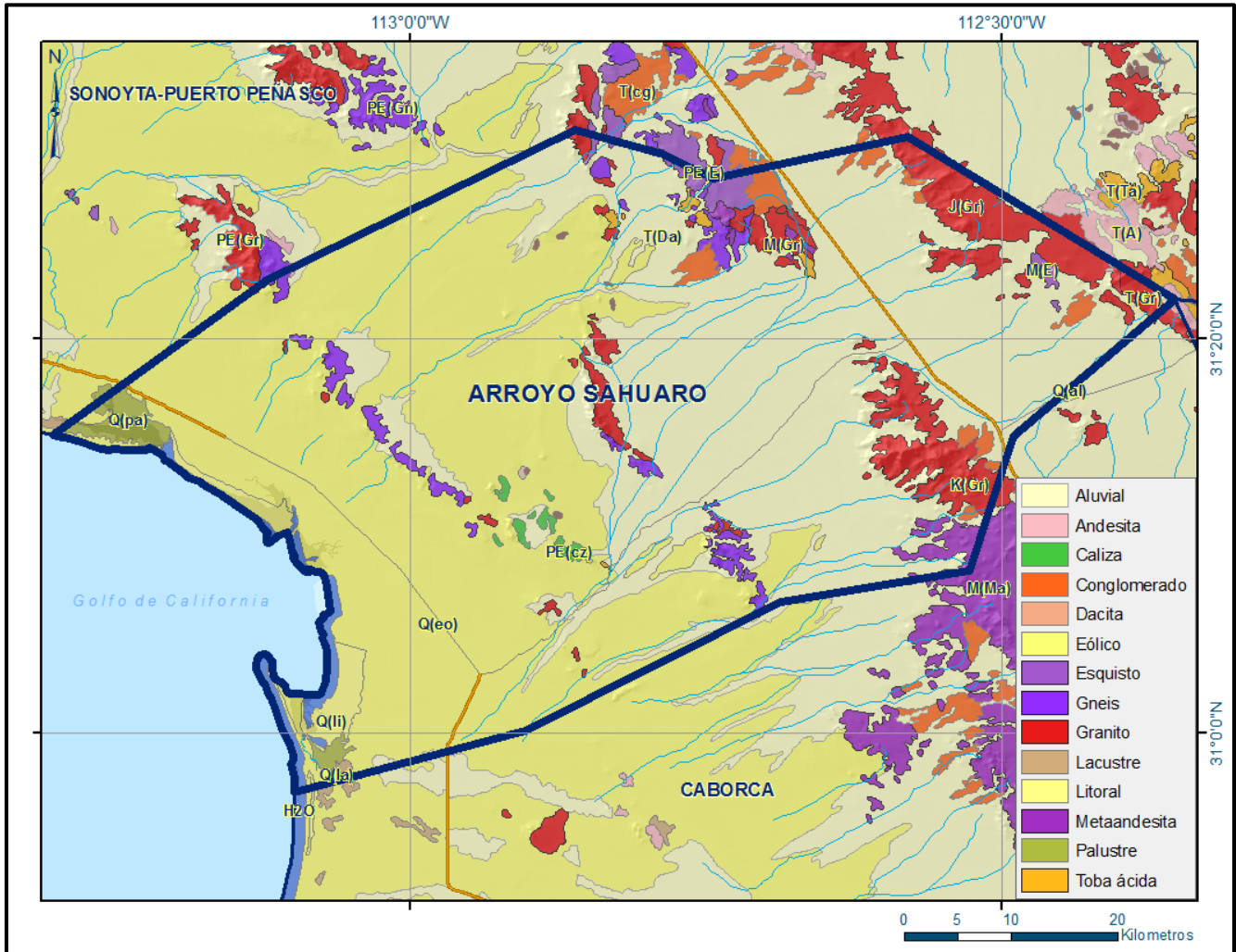


Figura 2. Mapa geológico del acuífero

## 4.2. Geología estructural

Los distintos eventos tectónicos que han sido documentados generan sistemas estructurales que se sobre imponen y mezclan entre sí. Como resultado de esta mezcla, las fallas y fracturas desarrollan patrones complejos que al final determinan las características de afloramiento de las unidades a nivel regional y local. Así, el análisis de los rasgos fisiográficos y geomorfológicos principales permite observar en términos generales sierras alargadas y orientadas NNW-SSE separados por amplias planicies aluviales y eólicas.

Esta distribución está controlada por fallas principales o maestras con una misma distribución general NNW-SSE con buzamientos al NE y al SW que en algunas ocasiones muestran lineamientos

secundarios representados por fallas y fracturas orientadas NNE-SSW (ortogonales al sistema estructural principal). Esto es, que las sierras están delimitadas por estructuras limítrofes que le otorgan su orientación general, lo que ayuda concebir la presencia de altos y bajos estructurales (*horst* y *graben*), tal como se presenta en la Sierra La Espuma y el Graben de Altar. Estas relaciones cortantes mediante estructuras limítrofes primarias pueden ser observadas en la distribución cartográfica de los intrusivos de composición granítica-granodiorítica del Cretácico Superior-Eoceno, que son anteriores a la tectónica extensiva y que presentan sistemas de fracturamiento y foliación paralelos a las tendencias estructurales regionales.

Aunque no afloran dentro del área que abarca el acuífero Arroyo Sahuaro, el emplazamiento de lavas basálticas al noroeste (Campo Volcánico El Pinacate), habla de la presencia de estructuras de alto ángulo y de gran profundidad en la región.

La presencia de grandes extensiones de coberturas sedimentarias no permite realizar especulaciones acerca de la situación estructural del basamento; sin embargo, las características de los afloramientos disponibles proporcionan información suficiente para establecer que los patrones pueden mantenerse a profundidad, notando que quizá una de las variaciones estructurales principales en área que abarca el acuífero Arroyo Sahuaro, la presencia de la traza de la Megacizalla Mojave-Sonora.

En general, las tendencias estructurales forman patrones NNW-SSE muy bien definidas y que están en su mayor parte determinadas por los sistemas extensivos del evento tectónico que generó la provincia morfotectónica del *Basin and Range*, la cual domina en gran parte la geología del noroeste del Estado de Sonora.

La mayoría de las unidades antiguas (anteriores al Terciario) presentan algún tipo de deformación penetrativa (pliegues y esquistosidad) y metamorfismo. Sin embargo, su participación dentro de los patrones estructurales primarios es mínima.

### **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo con los resultados de las exploraciones geofísicas realizadas por la empresa Planeación, Sistemas y Control, S. A. de C. V en 1992, que ejecutó 9 sondeos electromagnéticos (TEM's) en la parte centro – sur del acuífero, es posible definir la presencia de un acuífero, constituido en su porción superior por depósitos aluviales y en porción inferior por conglomerado compacto altamente resistivo que presenta baja permeabilidad.

El espesor de los depósitos aluviales no saturados varía hasta 80 m (unidad I), en tanto que el espesor que presentan los depósitos granulares saturados de agua salobre – dulce llega hasta 200 m (unidad II). No se determinó el espesor del conglomerado (unidad III) debido a que los sondeos no detectaron el basamento (figura 3).



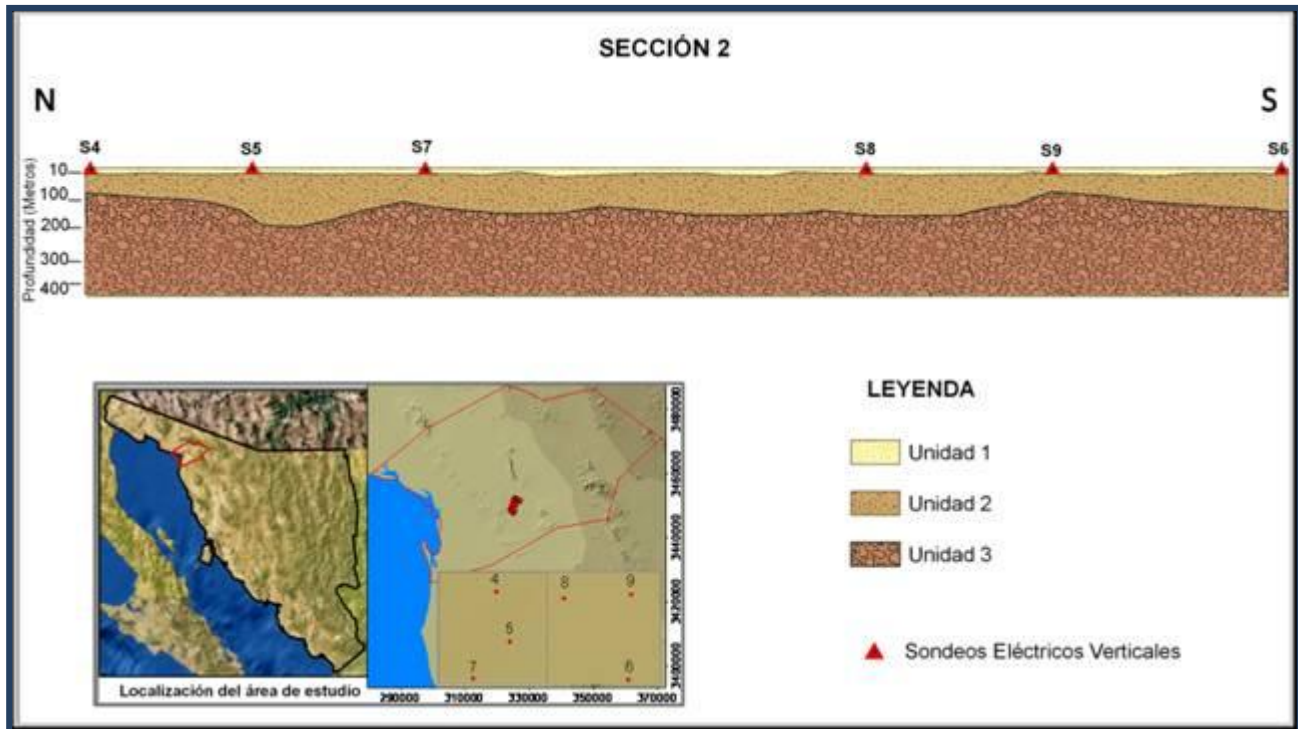


Figura 3. Sección hidrogeológica suroeste - noreste

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero es de **tipo libre**, formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por boleas, gravas y arenas no consolidadas, de alta permeabilidad y semiconsolidadas, que contienen horizontes de agua salada – salobre. Su explotación se localiza principalmente en el cauce de los arroyos principales. Debajo de esta secuencia el acuífero está conformado por conglomerados que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

### 5.2. Parámetros hidráulicos

De acuerdo a los resultados obtenidos en 5 pruebas de bombeo realizadas por IDEAS en 2009, los valores de transmisividad en abatimiento varían de  $2.88 \times 10^{-5}$  hasta  $4.83 \times 10^{-2}$ , y en recuperación de  $6.68 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $1.06 \times 10^{-1}$  (tabla 2).

El valor promedio de transmisividad obtenido en todas las pruebas es de  $1.795 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . Los mayores valores se presentan en la parte noreste del acuífero, en las zonas topográficamente más elevadas, y los menores en la zona cercana a la costa. La conductividad hidráulica se distribuye de una manera similar a la transmisividad, variando sus valores desde  $3.5 \times 10^{-3}$  en las partes altas hasta  $2.01 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  en la costa.

Las mayores conductividades hidráulicas (ASH-17 y ASH-08) fueron obtenidas en pozos perforados de poca profundidad, por lo que se asocian a depósitos aluviales formados por arenas y gravas principalmente. Por otro lado, los menores valores corresponden a pozos profundos, que posiblemente cortan horizontes arcillosos.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos obtenidas en las pruebas de bombeo

POZO	X	Y	NIVEL ESTÁTICO (m)	NIVEL DINÁMICO (m)	ABATIMIENTO (m)	CAUDAL (l/s)	ABATIMIENTO (METODO DE THEIS)		RECUPERACIÓN (THEIS-JACOB)	
							T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
ASH14	326390	3487375	48.61	50.2	1.59	1.5	1.06E-03	4.98E-05	1.48E-03	9.28E-05
ASH17	351166	3463877	29.77	29.78	0.01	0.8	4.83E-02	1.61E-03	1.06E-01	3.56E-03
ASH08	341713	3475347	10.41	10.52	0.11	1.8	6.82E-03	1.48E-03	1.56E-02	3.12E-03
ASH19	327868	3449816	25.7	36.61	10.91	1	2.88E-05	8.41E-07	6.89E-05	2.01E-06
SA11	315393	3436934	116.74	128.57	11.83	1.5	5.60E-05	3.50E-06	6.68E-05	4.17E-06
Promedio							1.13E-02	6.29E-04	2.46E-02	1.36E-03

T= Transmisividad K = Conductividad hidráulica

### 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 información del 2009 fue la que se utilizó para describir el comportamiento hidráulico debido a que es la más reciente y presenta mayor cobertura espacial.

### 5.4. Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático en 2009 (figura 4), los valores varían de 9.0 a 116.5 m. En las zonas cercanas a las sierras ubicadas al norte y este del acuífero se encuentran los niveles menos profundos, con valores de 10.5 m a 28.5 m y en la parte suroeste cercanos a la costa se presentan los niveles más profundos, que varían entre 43.5 m y 116.5 m.

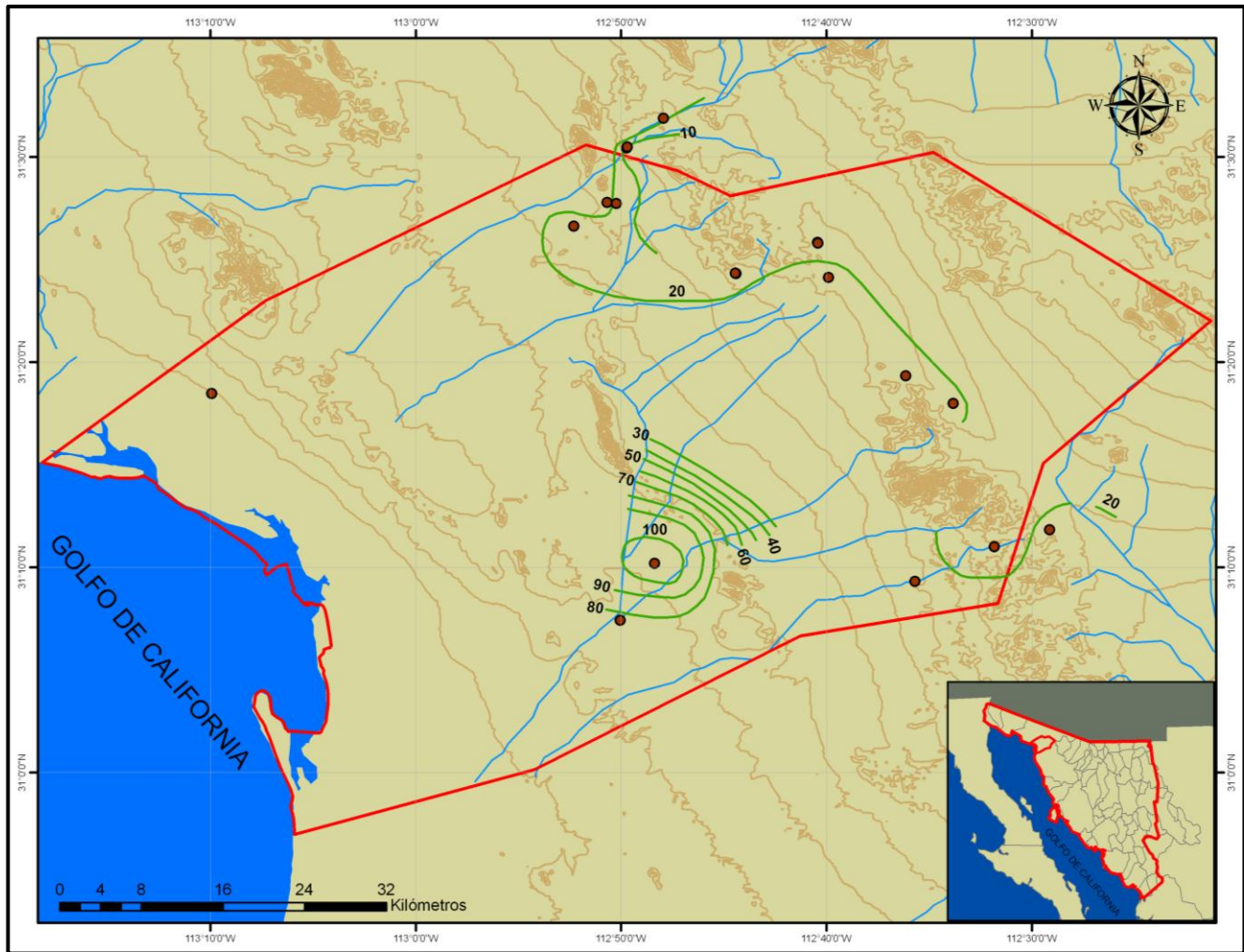


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 5), los valores muestran el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo presenta una dirección preferencial noreste –suroeste en la planicie aluvial, mostrando que no se han producido alteraciones de las condiciones naturales.

Los valores registrados varían desde -1.4 msnm hasta 486.0 msnm, presentándose las menores elevaciones en la parte suroeste del acuífero, cerca de la línea de costa, y las mayores al noreste. La dirección de flujo subterráneo es similar a la del drenaje superficial, con una tendencia general noreste- suroeste.



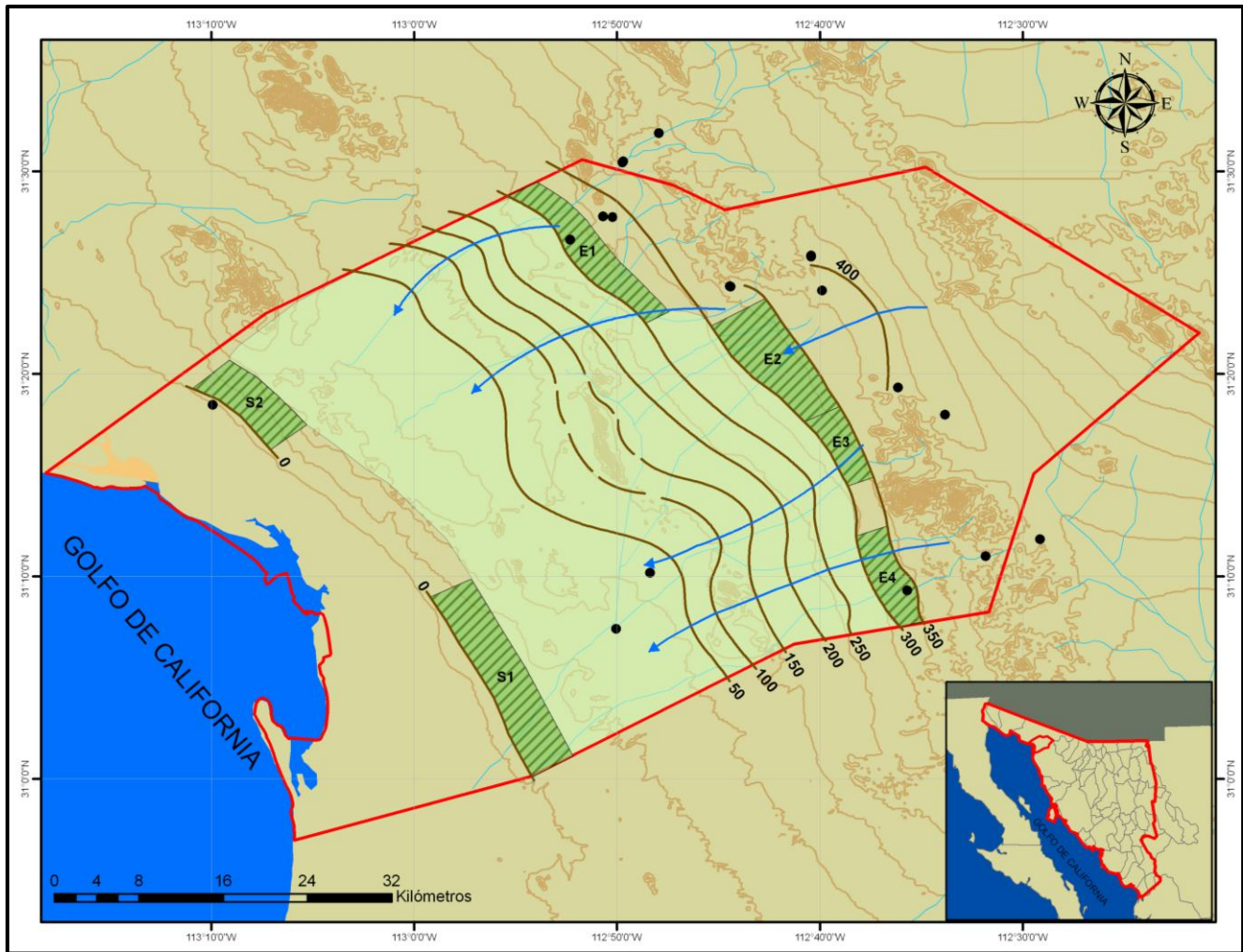


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

#### 5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos, como los reportados en el Atlas de aguas subterráneas del estado de Sonora, reflejan variaciones puntuales tanto positivas como negativas y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero, pues solo se pudo obtener la evolución en tres de ellos. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

## 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2009 se tomaron muestras de agua en 8 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos. Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 675 a 1956 ppm.

Con respecto a la conductividad eléctrica, en el acuífero se presenta agua dulce y agua salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Asociation (APHA, 1995). El primer caso se presenta en cuatro aprovechamientos cuyos valores varían de 1301 a 1501  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y el segundo en el resto de captaciones, con valores que van de 2790 a 4342  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El agua dulce se ubica en la porción norte del acuífero y el agua salobre en los pozos cercanos a la costa, a excepción de un aprovechamiento ubicado en la porción este (figura 6).

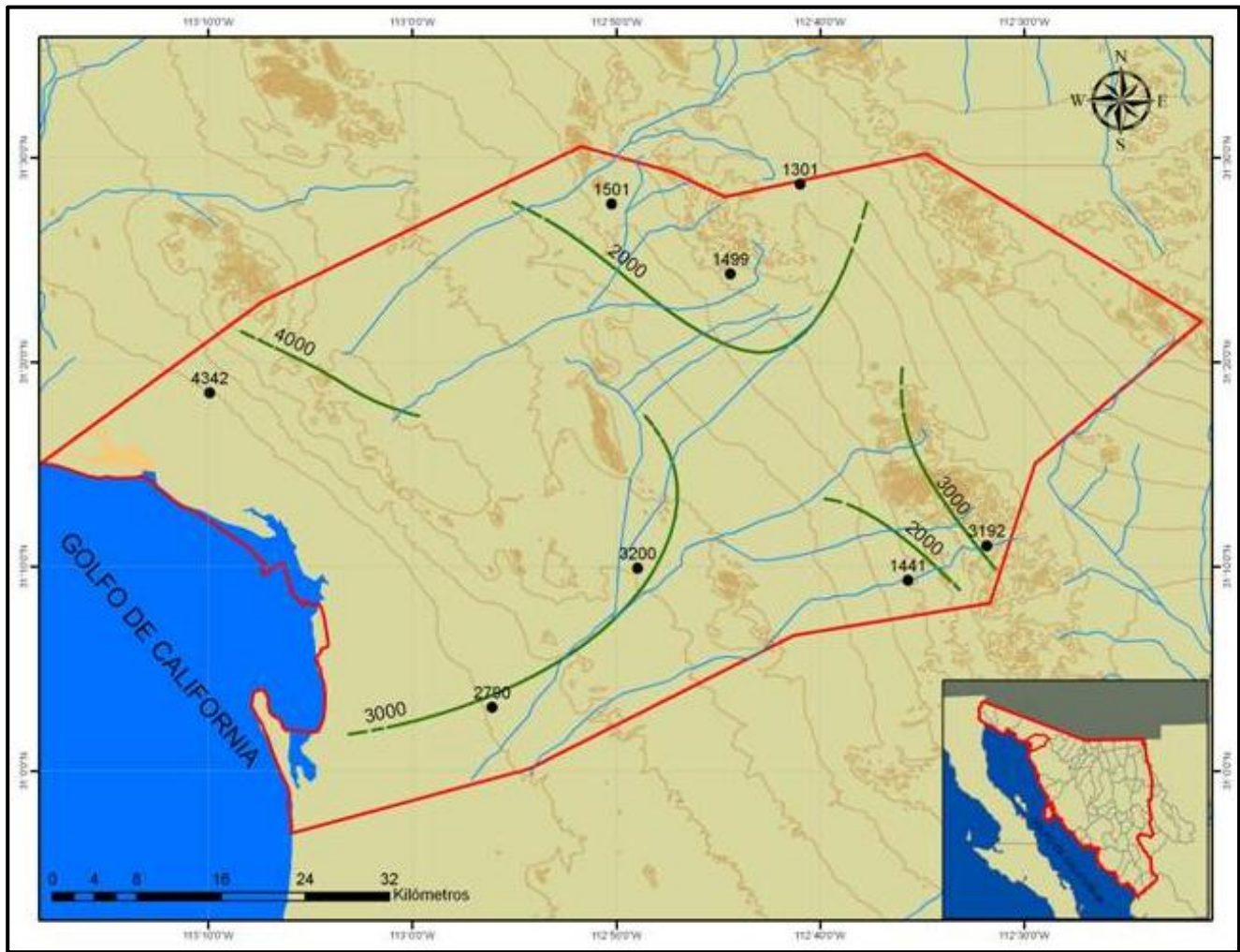


Figura 6. Curvas de isovalores de conductividad eléctrica

La representación gráfica de los resultados de los análisis fisicoquímicos (diagramas de Stiff) refleja que en tres de los aprovechamientos el tipo de agua presente es la Clorurada Sódica, ubicados en la costa, al centro del acuífero y hacia el norte. Es posible que los dos primeros presenten mezcla con el agua de mar y que el tercero se encuentre cortando horizontes evaporíticos. En dos aprovechamientos el agua es Bicarbonatada Cálcica, los cuales representan agua de reciente infiltración. También se presenta un aprovechamiento al este del acuífero con agua Sulfatada Cálcica, que indica aguas un poco más evolucionadas que tuvieron intercambio iónico con las rocas que conforman el medio geológico. Por último, se obtuvo un aprovechamiento con agua Bicarbonatada Sódica, localizado en la porción occidental.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2009, existen en el acuífero un total de 34 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 27 se encuentran activos y los 7 restantes inactivos.

El volumen de extracción calculado es de **4.3 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 2.1 hm<sup>3</sup> (49%) se destinan al uso industrial, seguido por el uso agrícola-industrial con 1.3 hm<sup>3</sup> (30%), y el uso agrícola con 0.8 hm<sup>3</sup> (19%). Los 0.1 hm<sup>3</sup> (2%) restantes se utilizan para satisfacer las necesidades de los sectores pecuario, doméstico, servicios y público-urbano.

## **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 año 2009 en una superficie de 1426 km<sup>2</sup>, 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:

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

Donde:

**R<sub>v</sub>**= Recarga vertical;

**E<sub>h</sub>**= Recarga por flujo horizontal;

**B**= Bombeo;

**S<sub>h</sub>**= Salidas por flujo horizontal;

**ΔV(S)**= Cambio en el volumen almacenado;

### **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R<sub>t</sub>) 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<sub>v</sub>) y por flujo subterráneo (E<sub>h</sub>).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R<sub>r</sub>), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R<sub>i</sub>). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola en incipiente, para fines del balance se considera que no existe recarga inducida. Por lo que **R<sub>i</sub> = 0**.

#### **7.1.1. Recarga vertical (R<sub>v</sub>)**

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 (R<sub>v</sub>) se obtiene lo siguiente:

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

#### **7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E<sub>h</sub>)**

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:

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

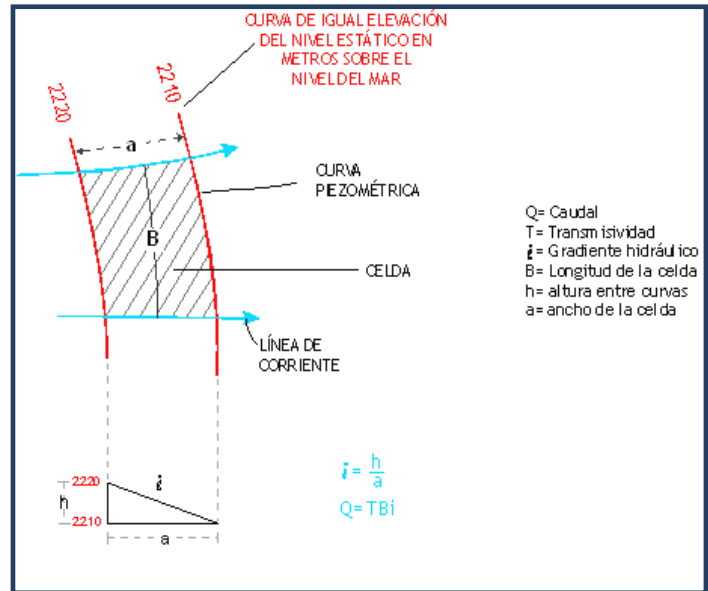
Donde:

**Q**= Gasto;

**T**= Transmisividad;

**B**= Longitud de la celda;

**i**= Gradiente hidráulico;



De acuerdo con la configuración de la elevación 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. Se utilizó el valor promedio de conductividad hidráulica (K) obtenido en las etapas de recuperación y abatimiento en las pruebas de bombeo que se ejecutaron en pozos profundos, en el estudio de realizado en el 2009, debido a que los valores obtenidos en las dos pruebas restantes son reflejo de condiciones locales del subsuelo que no pueden extrapolarse a todo el acuífero. El valor de espesor saturado fue estimado a partir de la información hidrogeológica y del censo de aprovechamientos.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i (m)	Espesor Saturado (b)	K (m/s)	T ( $m^2/s$ )	CAUDAL Q ( $m^3/s$ )	VOLUMEN ( $hm^3/año$ )
E1	15840	2,890.00	25	0.008651	15	2.52E-05	3.78E-04	0.051795	1.6
E2	11330	4,790.00	50	0.010438	45	2.52E-05	1.13E-03	0.134115	4.2
E3	6840	2,390.00	50	0.020921	15	2.52E-05	3.78E-04	0.054090	1.7
E4	8950	2,860.00	50	0.017483	15	2.52E-05	3.78E-04	0.059145	1.9
TOTAL ENTRADAS									9.4

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **9.4  $hm^3$  anuales**

## 7.2. Salidas

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



### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **4.3hm<sup>3</sup>/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, a partir también de la configuración de elevación del nivel estático presentada para el 2009, de los valores de conductividad hidráulica obtenidos por IDEAS (2009), y la sección hidrogeológica presentada. Los datos y el cálculo se observan en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas horizontales

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i (m)	Espesor Saturado(b)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	18210	3260	10	0.003067	120	2.52E-05	3.00E-03	0.167577	5.3
S2	4780	3400	10	0.002941	120	2.52E-05	3.00E-03	0.042176	1.3
TOTAL SALIDAS									6.6

El volumen total de salidas por flujo subterránea horizontal asciende a **6.6 hm<sup>3</sup>/año**.

### 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. Para este caso, como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo, por lo que  **$\Delta V(S) = 0$** .

### Solución a 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 recarga vertical (Rv), que se calcula a partir de la ecuación (2):

$$\begin{aligned} R_v &= S_h + B \pm \Delta V(S) - E_h & (2) \\ R_v &= 6.6 + 4.3 - 0.0 - 9.4 \\ R_v &= 1.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + E_h \\ R_t &= 1.5 + 9.4 \\ R_t &= 10.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 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 **10.9hm<sup>3</sup> anuales**.

### 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.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **3.3 hm<sup>3</sup> anuales** que corresponde al 50% de las salidas horizontales, que deben mantenerse para hacer frente a la intrusión marina, ya que la zona en donde se evaluaron está muy distante de la zona costera.

### **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 4'122,405m<sup>3</sup>/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.

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

$$\text{DAS} = 10.9 - 3.3 - 4.122405$$

$$\text{DAS} = 3.477595 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **3'477,595 m<sup>3</sup> 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 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 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, 1992. Estudios básicos y proyectos para el desarrollo agropecuario de la región Sahuaro-Costa Rica, Sonora. Primera etapa. Realizado por la empresa Planeación, Sistemas y Control, S.A de C.V.

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).