

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Puerto Libertad (2617),  
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							
2617	PUERTO LIBERTAD	8.2	1.3	6.225084	4.6	0.674916	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 2617 PUERTO LIBERTAD, ESTADO DE  
SONORA***

***México D.F., Diciembre de 2009***

## 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 .....	7
3.1.	Provincias fisiográficas .....	7
3.2.	Clima .....	8
3.3.	Hidrografía .....	8
3.4.	Geomorfología .....	9
4.	GEOLOGÍA .....	9
4.1.	Estratigrafía .....	10
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 (2009) .....	16
5.4.3.	Evolución anual del nivel estático .....	17
5.5.	Hidroggeoquímica 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.	Flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	20
7.2.	Salidas .....	22
7.2.1.	Bombeo (B) .....	22
7.2.2.	Flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	22
7.2.3.	Evapotranspiración (ETR) .....	22
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	24
8.	DISPONIBILIDAD .....	25
8.1.	Recarga total media anual (Rt) .....	26
8.2.	Descarga natural comprometida .....	26
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas .....	26
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas .....	26
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	28

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 Puerto Libertad, definido con la clave 2617 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción occidental del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 29° 33' y 30° 14' de latitud norte y 112° 05' y 112° 47' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2,030 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con el acuífero Caborca, al este y sur con Arivaipa y al oeste con el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente se encuentra ubicado en los municipios Pitiquito y Caborca. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.



Figura 1. Localización del acuífero

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2617 PUERTO LIBERTAD							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1.00	112.00	28.00	55.90	29.00	38.00	51.00	
2.00	112.00	25.00	17.60	29.00	34.00	44.50	
3.00	112.00	25.00	57.10	29.00	33.00	20.40	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
4.00	112.00	47.00	0.20	30.00	14.00	0.90	
5.00	112.00	43.00	0.50	30.00	14.00	7.30	
6.00	112.00	41.00	27.80	30.00	12.00	52.10	
7.00	112.00	26.00	24.50	30.00	12.00	15.80	
8.00	112.00	21.00	58.20	30.00	4.00	25.70	
9.00	112.00	10.00	17.80	30.00	3.00	46.50	
10.00	112.00	5.00	58.10	29.00	56.00	5.40	
11.00	112.00	23.00	27.80	29.00	52.00	7.30	
12.00	112.00	32.00	7.60	29.00	45.00	41.60	
1.00	112.00	28.00	55.90	29.00	38.00	51.00	

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Puerto Libertad pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, en la parte oeste del meridiano 110° de Greenwich, del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de la aguas del subsuelo, en dicha zona, que no quedaron incluidos en las vedas impuestas en los ordenamientos señalados en el considerando primero de este Decreto”*, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978”. Este decreto es de tipo II y sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2009), los municipios Pitiquito y Caborca se localizan en zona de disponibilidad 4. El usuario principal del agua es el sector industrial (CFE) y público urbano. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Recientemente se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación en la superficie que cubre este acuífero. Adicionalmente existen otros que contienen información de carácter regional:

**ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA. UNIVERSIDAD DE SONORA, ESTUDIO REALIZADO PARA LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 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. 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.

**ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y PIEZOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS DE LA REGIÓN NOROESTE. UNIVERSIDAD DE SONORA, ESTUDIO REALIZADO PARA LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2006.** Los objetivos del estudio fueron establecer una red de pozos para la toma de muestras de agua y el análisis físicoquímico de las mismas, así como realizar el recorrido para la lectura piezométrica, que permitió configurar la profundidad y elevación del nivel estático en los pozos muestreados. Se definió la presencia de intrusión marina en algunos acuíferos.

**ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA SU DESALACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE CABORCA, PUERTO LIBERTAD, ARIVAIPA Y FUERTE MAYO, SONORA. UNIVERSIDAD DE SONORA, ESTUDIO REALIZADO PARA LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2007.** Mediante actividades de

campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, nivelación de brocales de pozos y estimación de parámetros hidráulicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. Define un frente de intrusión marina frente a la bahía, entre el centro y sur de Puerto Libertad y se definen dos zonas de interfase de agua salina; una pluma de agua salobre que penetra entre Puerto Libertad y el oeste rumbo a la Sierra Bacha con espesores de hasta 100 m, y otra de mayor longitud que penetra continente adentro y se extiende desde Puerto Libertad en dirección noreste, con espesores variables desde unos pocos metros hasta un promedio de 60 m de agua salobre-salada.

**ESTUDIO DE EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD, SONORA. COMO PARTE DEL ESTUDIO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE USO DE AGUA PRODUCIDA POR EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ETANOL, REALIZADO POR LA EMPRESA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ACUÍFEROS Y AMBIENTE EN NOVIEMBRE DE 2007, PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE.** Complementa las actividades realizadas en el estudio llevado a cabo por la Universidad de Sonora y efectúa el muestreo de aguas subterráneas para su análisis fisicoquímico correspondiente. En este trabajo se plantea el balance de agua subterránea y la estimación de la disponibilidad, de acuerdo como lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD HIDROGEOLÓGICA, NIVEL 2: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO ALCANCE SEMIDETALLE, PREDIO BIOFIELDS., QUE FUE REALIZADO POR LA EMPRESA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ACUÍFEROS Y AMBIENTE EN SEPTIEMBRE DE 2008, PARA LA EMPRESA BIOFIELDS.** Constituye un estudio hidrogeológico de mayor detalle, que incluye la realización de sondeos geofísicos para la investigación del subsuelo. Identifica tres fosas de importancia:

Fosa 1.- Es la más importante de ellas por su extensión, se ubica en la porción centro– suroeste y abarca aproximadamente un área de 105 km<sup>2</sup>. Cuenta con tres depresiones de importancia, que alcanzan 500 m, 700 m y 800 m de profundidad.

Fosa 2.- Se localiza en la porción noroeste del área de estudio. Su extensión es de aproximadamente 30 km<sup>2</sup> y alcanza una profundidad máxima de 700 m.

Fosa 3.- Se encuentra al sur de la Sierra de Aguirre, en la porción este del área. Su extensión es pequeña, pues abarca aproximadamente 16 km<sup>2</sup>.

Identifica y caracteriza la forma de un frente de intrusión marina, que penetra hasta 12 km tierra adentro al continente. La profundidad a la que se encuentra la cuña varía entre 46 y 85 m, y su espesor oscila entre 140 y 200 m.



**ESTUDIO DE INTEGRACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA DEL SISTEMA AMBIENTAL REGIONAL Y EL PREDIO DEL PROYECTO SONORA FIELDS MUNICIPIO DE PITIQUITO, SONORA, QUE ES REALIZADO POR LA EMPRESA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ACUÍFEROS Y AMBIENTE EN OCTUBRE DE 2009, PARA LA EMPRESA BIOFIELDS.** El presente estudio actualmente se encuentra en la etapa de edición final. Sin embargo, la información del censo y piezometría se utilizó en la elaboración del presente documento.

La información de estos cuatro últimos estudios constituye 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. Provincias fisiográficas**

Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Desierto o Llanura Sonorense, la cual se divide en dos subprovincias y una discontinuidad: Sierras y Llanuras Sonorenses, Desierto de Altar y Sierra del Pinacate.

El acuífero Puerto Libertad se encuentra dentro de la subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses, la cual está formada por sierras bajas separadas por llanuras. En las sierras predominan rocas ígneas intrusivas ácidas, aunque también son importantes, particularmente en la parte central de la subprovincia, rocas lávicas, metamórficas, calizas antiguas y conglomerados del Paleógeno. Las llanuras representan alrededor de 80% de la subprovincia y están cubiertas en su mayor parte o en toda su extensión por amplios abanicos aluviales que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes.

Se identifican las siguientes formas fisiográficas:

- *Gran Bajada con Lomerío*: se presenta en la mayor parte del acuífero, de norte a sur, al pie de las sierras y en las partes topográficamente más bajas.
- *Sierra Escarpada Compleja*: es la segunda de mayor extensión dentro del área de estudio y se presenta en las serranías más elevadas en la porción central al norte y sur del acuífero.
- *Sierra Escarpada del Noroeste*: es la forma fisiográfica de menor extensión en el acuífero y se localiza en las sierras en la parte central occidente del área de estudio.

### **3.2. Clima**

El clima que prevalece en la región según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964), es el BW<sub>hw</sub>(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: Puerto Libertad, Pitiquito, Félix Gómez y Puerto Peñasco. Sólo la estación Puerto Libertad se encuentra dentro del área de estudio, y de acuerdo a los polígonos de Thiessen es la única que influye en el área.

El periodo de análisis varía debido a la falta de datos en algunas estaciones; sin embargo se considera el intervalo de 46 años comprendido de 1960 a 2006.

El promedio de temperatura anual es de 21.3 °C. Con base en el análisis climatológico se obtuvo una precipitación anual mínima de 84.6 mm. Se considera una lámina de evaporación potencial anual de 2264

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero Puerto Libertad, se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 8 "Sonora Norte", cuenca del río San Ignacio, dentro de la subcuenca Puerto Libertad.

El río San Ignacio y su afluente arroyo Arivaipa son las únicas corrientes con cuenca de extensión importante en el extremo sur de la Región Hidrológica 8; descarga directamente en el Golfo de California, a la altura de la población El Desemboque, Sonora.

Su cuenca es árida, carente de vegetación y prácticamente no existen aprovechamientos de aguas superficiales; solo pequeños bordos de almacenamiento destinados a las actividades pecuarias.

La corriente del Río San Ignacio tiene su origen en el cerro El Tordillo, ubicado en el extremo noroeste de la cuenca, a una altitud de 1,120 m. Su curso inicial es norponiente siendo desviada hacia el sur por las estribaciones del cerro Jojoba y otras formaciones montañosas menores del parteaguas occidental. A 23 km al noreste de su desembocadura recibe por su margen izquierda, a una altitud de 170 m, las aportaciones del arroyo Arivaipa que drena la porción suroeste del cerro El Tordillo; cambia su curso al poniente y por su margen derecha recibe al Arroyo Gallestamos y otros menores; posteriormente cambia nuevamente su curso al suroeste para pasar entre las Sierras Bacha y Seri para finalmente descargar en el Golfo de California.

### **3.4. Geomorfología**

La expresión morfológica en la cuenca define una pendiente general que varía de moderada a baja. La cuenca se encuentra conformada por múltiples corrientes de carácter intermitente, entre las que destaca el río San Ignacio. Dentro del acuífero Puerto Libertad, las corrientes destacadas son los arroyos El Julio, El Carbón y El Dátil

La topografía de la cuenca es suave, con pendiente general uniforme hacia el suroeste. Las principales formaciones montañosas dentro de la cuenca tienen altitudes comprendidas entre 500 y 1,000 m. Las pendientes fuertes se presentan en la cercanía de los afloramientos de las rocas intrusivas. En la porción sur y centro-occidental los rasgos morfológicos son más accidentados, consistiendo en sierras orientadas con una dirección preferencial NW-SE.

## **4. GEOLOGÍA**

La geología regional está constituida por un basamento ígneo-metamórfico del Proterozoico Inferior-Medio, denominado Complejo Metamórfico Bámore (Longoria et al., 1978) y constituido por gneises y esquistos, afectados por un granito micrográfico denominado Granito Aibó, fechado en 1,100 Ma por Anderson y Silver (1977); ambos afloran en la porción sureste del acuífero. Sobreyacen discordantemente a esta unidad sedimentos de edad proterozoica, representados por dolomías y areniscas, denominadas Capas Gamuza, que se ubican en la porción oriental del área. Sobreyaciendo concordante y transicionalmente a dichas capas, se encuentran paquetes de calizas y areniscas; en la porción centro-norte y este, afloran discordantemente (hiato en el Cámbrico superior) calizas y lutitas de facies de cuenca profunda, de edad Ordovícico-Devónico. Al norte de la Sierra El Álamo en la porción central, se localizan discordantemente calizas y limolitas de la Formación Monos (Cooper, 1965), del Pérmico Superior.

También de manera discordante a la unidad anterior, afloran calizas y lutitas del Pérmico Superior-Triásico Superior, superpuestas discordantemente por meta-areniscas y meta-lutitas del Triásico Superior, que a su vez es cubierta discordantemente por un paquete de areniscas y limolitas, calizas y areniscas, areniscas y conglomerados polimícticos del Jurásico, correlacionables con la Formación San Antonio (González, 1980); estas unidades afloran principalmente en la Sierra El Antimonio.

En forma aislada, en el norte del área de estudio, afloran rocas graníticas y granodioríticas de edad Jurásico Superior (Steward T.H., 1986). Cabalgando a rocas jurásicas, se localizan rocas metavolcánicas y metasedimentarias del Jurásico Medio, consistentes en riolitas, andesitas, areniscas y conglomerados deformados, formando casi la totalidad de Sierra La Gloria; en esta localidad cabalga sobre rocas sedimentarias del Jurásico Inferior y Cretácico-Paleógeno. En contacto por falla normal con la anterior, se encuentra una unidad metasedimentaria de la misma edad, constituida por conglomerados polimícticos y areniscas deformadas, expuesta en el Cerro El Álamo. En esta misma porción cabalga a la Formación Morita, constituida por lutitas y areniscas,

de edad Aptiano y a su vez está en contacto por falla normal con una secuencia de riolitas y andesitas del Complejo Volcánico El Charro.

Cubriendo discordantemente a las rocas triásicas y jurásicas, aflora una secuencia volcanosedimentaria constituida por andesitas, areniscas y andesitas del Cretácico Superior correspondientes a la Formación Tarahumara, que aflora en la Sierra El Álamo. Sobreyaciendo discordantemente y en contacto tectónico con las unidades del Jurásico Inferior, se ubican en el flanco sur-occidental de la Sierra La Gloria y Cerro El Álamo, conglomerados polimícticos rojos y areniscas, de edad Cretácico Superior- Paleoceno. Afectando parcialmente a las anteriores, se encuentran rocas intrusivas representadas por gabros, granitos, granodioritas y dioritas, que se encuentran distribuidas en la mayor parte del área de estudio; estas unidades han sido fechadas por el método K-Ar, obteniendo edades que van de  $64.3 \pm 2$  Ma (Damon et al., 1983) a  $80.9 \pm 1.8$  Ma (De Jong, 1990).

El Pleistoceno está representado por depósitos semiconsolidados y no consolidados de piedemonte, constituidos por conglomerados polimícticos, gravas y arenas y el Holoceno por materiales aluviales, depósitos eólicos, lacustres, palustres y aluvión.

#### **4.1. Estratigrafía**

El **Neógeno** está representado por metareniscas, metalutitas, esquistos y gneises que afloran como techos colgantes sobre rocas granodioríticas y dioríticas Cretácico-Terciarias, afloran noroeste y sureste de Puerto Libertad. Esta unidad posiblemente sea correlacionable con la Formación Antimonio del Pérmico-Jurásico Inferior; aunque también se presenta sobre rocas del Terreno Cortés, lo que implica la amalgamación de los 2 terrenos durante el Pérmico Tardío y el Triásico Medio

Arenisca y limolitas, calizas y areniscas de edad **Jurásica**, afloran en la región. En la Isla Tiburón y en la costa de Sonora se distribuyen pequeños afloramientos aislados de rocas metasedimentarias de edad **Jurásico Medio**, constituidas por pizarras y caliza recrystalizadas intercaladas. Se encuentra intrusionada por el batolito Laramide de Sonora y en la Isla Tiburón subyace discordantemente a rocas volcánicas ácidas y basaltos del Mioceno. Esta unidad presenta metamorfismo de bajo grado y su protolito está asociado a lutitas y calizas que fueron recrystalizadas, foliadas y plegadas.

El **Mesozoico** está caracterizado en el acuífero por una intensa actividad volcánica y tectónica evidenciada por los afloramientos de rocas graníticas y granodioríticas de textura media y gruesa. Las intrusiones graníticas fueron seguidas por bastas erupciones con derrames de lava que penetraron a través de los cuerpos intrusivos, formando una red de diques.

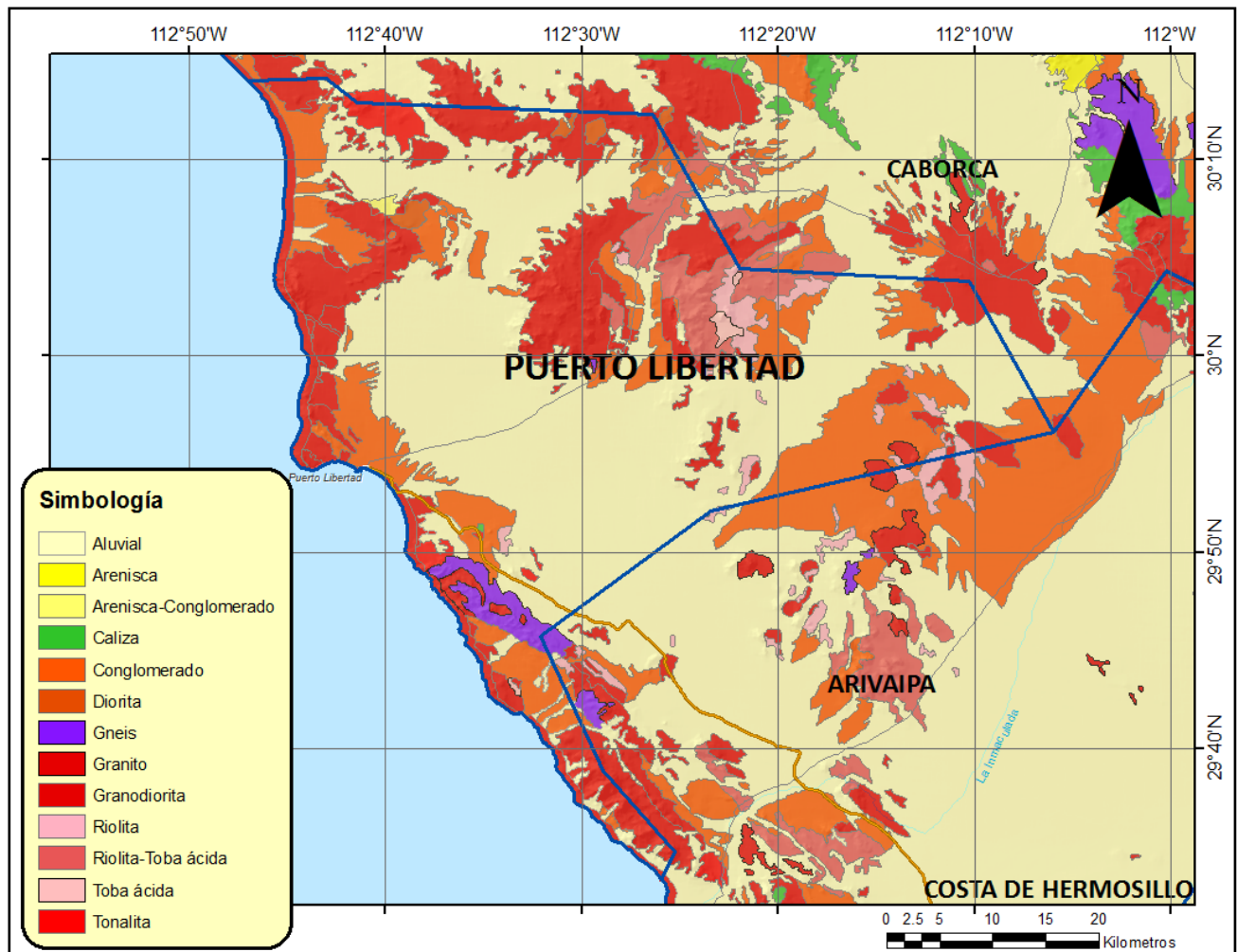
Las rocas mesozoicas en el área corresponden a esquistos, los cuales se encuentran en un pequeño afloramiento localizado en la zona costera. En contacto con estos esquistos se presenta una secuencia de lutitas-areniscas. Al norte de Puerto Libertad se localiza un afloramiento de diorita y varios de tonalita de edad cretácica (figura 2).

El **Cenozoico** se caracteriza también por una actividad volcánica que se muestra por la presencia de derrames lávicos de tipo ácido, representado por riolitas distribuidas en la cuenca. A este tipo de rocas se le atribuye una edad del Paleógeno (Mioceno-Plioceno).

También existen andesitas y basaltos, así como extensos afloramientos de conglomerados, los cuales están diseminados sobre toda el área. A misma era pertenece una pequeña secuencia de arenisca, conglomerado y limonita, que está expuesta al norte de Puerto Libertad.

Las rocas del **Neógeno** en el área están representadas por ígneas intrusivas y extrusivas. Al suroeste se localizan afloramientos de riolita-toba ácida y riolita-toba ácida; también existen afloramientos dispersos de riolita, riolita y toba ácida. En el extremo norte del acuífero se exhibe un afloramiento de granito. Respecto a rocas sedimentarias terciarias, se tienen secuencias de areniscas-limolitas en el sureste.

Durante el **Cuaternario** prevalecieron condiciones continentales y es representado por el relleno del valle aluvial, compuesto por grava, arena y arcilla y de espesor considerable. Estos depósitos cuaternarios conforman el acuífero más importante actualmente en explotación.



#### 4.2. Geología estructural

La estructura regional en Sonora más sobresaliente es la hipotética Megacizalla Mojave-Sonora de Anderson y Silver (2005), que corresponde a una estructura sinistral con un desplazamiento lateral de 700 a 800 km, con orientación NW-SE, la cual fue interpretada como una falla activa durante el Jurásico Inferior-Medio.

El estilo de deformación de las rocas sobre la traza de la megacizalla se manifiesta como zonas de cabalgaduras, esquistosidad y escamas o pequeñas napas. Superpuestas a este estilo de deformación, existen cabalgaduras, plegamientos y esquistosidad que afectan tanto a las rocas jurásicas como a las del Cretácico Inferior, atribuibles a la Orogenia Laramide.

Durante el Cretácico Tardío-Paleógeno, se evidencia una etapa de intenso tectonismo, representada por grandes cabalgaduras y plegamientos, en las que rocas del basamento

proterozoico cristalino y sedimentarias del Proterozoico Superior y Cámbrico, cabalgan sobre las rocas sedimentarias del Jurásico Inferior como se observa en las sierras La Víbora y La Joroba donde el Precámbrico sedimentario se encuentra fuertemente plegado.

También se evidencian en algunos lugares fallas inversas como en la Sierra El Álamo donde metaconglomerados cabalgan a rocas de la Formación Morita, que atestiguan la tectónica compresiva que los afectó. De Jong (1988), concluye que el cabalgamiento en el área tuvo lugar durante el Cretácico Tardío, entre 98 y 80 Ma, y que corresponde a la Orogenia Laramide. La mayor parte de la configuración actual de la región se debe al fallamiento normal del Paleógeno-Neógeno.

La tectónica producida durante esta fase trunca las estructuras preexistentes y las estructuras anteriores quedan, en ocasiones, completamente enmascaradas por este fallamiento regional de tipo normal, atribuido a la distensión de cuencas y sierras ("Basin and Range").

#### **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo con los resultados de las exploraciones geológicas y geofísicas realizadas en 2008, en las cuales se ejecutaron 33 sondeos electromagnéticos (TEM's) en la parte central del acuífero 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 rocas ígneas extrusivas e intrusivas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El espesor de los depósitos aluviales varía desde algunas decenas de metros hasta los 350, en tanto que para las rocas fracturadas se han identificado hasta 80 m, de acuerdo con pozos exploratorios. Ambas unidades contienen tanto agua dulce como salobre-salada. Las mismas rocas fracturadas constituyen las fronteras y basamento hidrogeológico cuando el fracturamiento desaparece.

Con la información de los TEM's se construyeron 14 secciones geoeléctricas que fueron correlacionadas con la información geológica para definir secciones hidroestratigráficas, 8 de las cuales son paralelas a la costa, y con una dirección W-E, de 8 a 10 km de longitud y las 6 secciones restantes tienen una orientación SW-NE con aproximadamente 12 a 15 km de longitud. A partir de las secciones se conceptualizó el basamento granítico fracturado y alterado, posiblemente saturado con agua salada en zona próxima a la costa y un segundo basamento sano, cuyo afloramiento en superficie corresponde a la Sierra los Cirios, que actúa como barrera impermeable a la intrusión marina.

## 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 en su porción superior por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por boleos, gravas y arenas no consolidadas, de alta permeabilidad y semiconsolidadas, que contienen horizontes de agua salada – salobre. Su explotación se localiza principalmente en la región centro – este del acuífero, donde su espesor es mayor. Debajo de esta secuencia, el acuífero está conformado por conglomerados y una secuencia de rocas volcánicas e intrusivas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

### 5.2. Parámetros hidráulicos

No se han realizado pruebas de bombeo en los aprovechamientos de la región. En los estudios llevados a cabo recientemente por la empresa IDEAS, S.A. de C.V. se identificó que la mayoría de aprovechamientos se encuentran inactivos o no se puede medir el nivel del agua. Sin embargo, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Caborca y Arroyo Sahuaro, cuya génesis y evolución geológica son semejantes, podemos adoptar los valores de los parámetros hidrodinámicos obtenidos de las pruebas de bombeo.

Los valores de transmisividad extremos varían de 173 a 6048 m<sup>2</sup>/día (**2.0 a 70.0 x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s**), con valores promedio que oscilan entre **5.0 y 40.0 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s**). Estos valores son consistentes con los obtenidos en el acuífero Arroyo Sahuaro, cuyo estudio de evaluación actualmente está llevando a cabo la Comisión Nacional del Agua (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo (acuífero Arroyo Sahuaro, IDEAS 2009)

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	50.20	1.59	1.50	1.06E-03	4.98E-05	1.48E-03	9.28E-05
ASH17	351166	3463877	29.77	29.78	0.01	0.80	4.83E-02	1.61E-03	1.06E-01	3.56E-03
ASH08	341713	3475347	10.41	10.52	0.11	1.80	6.82E-03	1.48E-03	1.56E-02	3.12E-03
ASH19	327868	3449816	25.70	36.61	10.91	1.00	2.88E-05	8.41E-07	6.89E-05	2.01E-06
SA11	315393	3436934	116.74	128.57	11.83	1.50	5.60E-05	3.50E-06	6.68E-05	4.17E-06

T= Transmisividad K = Conductividad hidráulica

Con respecto al coeficiente de almacenamiento, los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo ejecutadas en el acuífero Caborca, reportan valores que oscilan entre **8x10<sup>-5</sup> y 1x10<sup>-1</sup>**.



### 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, 2007 y 2009. Debido a que la que corresponde a este último es la que presenta mayor cobertura espacial, se utilizó para describir el comportamiento hidráulico.

### 5.4. Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el 2009(figura 3), los valores varían de 3.0 a 136 m. Los valores más bajos se registran hacia la zona costera, al sureste del poblado Puerto Libertad, aumentando gradualmente por efecto de la topografía hacia las porciones más altas, hacia los alrededores del Predio Quince de Mayo, en la porción sureste del acuífero. Este comportamiento sólo se mantiene en el relleno aluvial de la planicie, ya que hacia las estribaciones de las sierras, a lo largo del arroyo El Carbón, la profundidad al nivel estático disminuye notablemente.

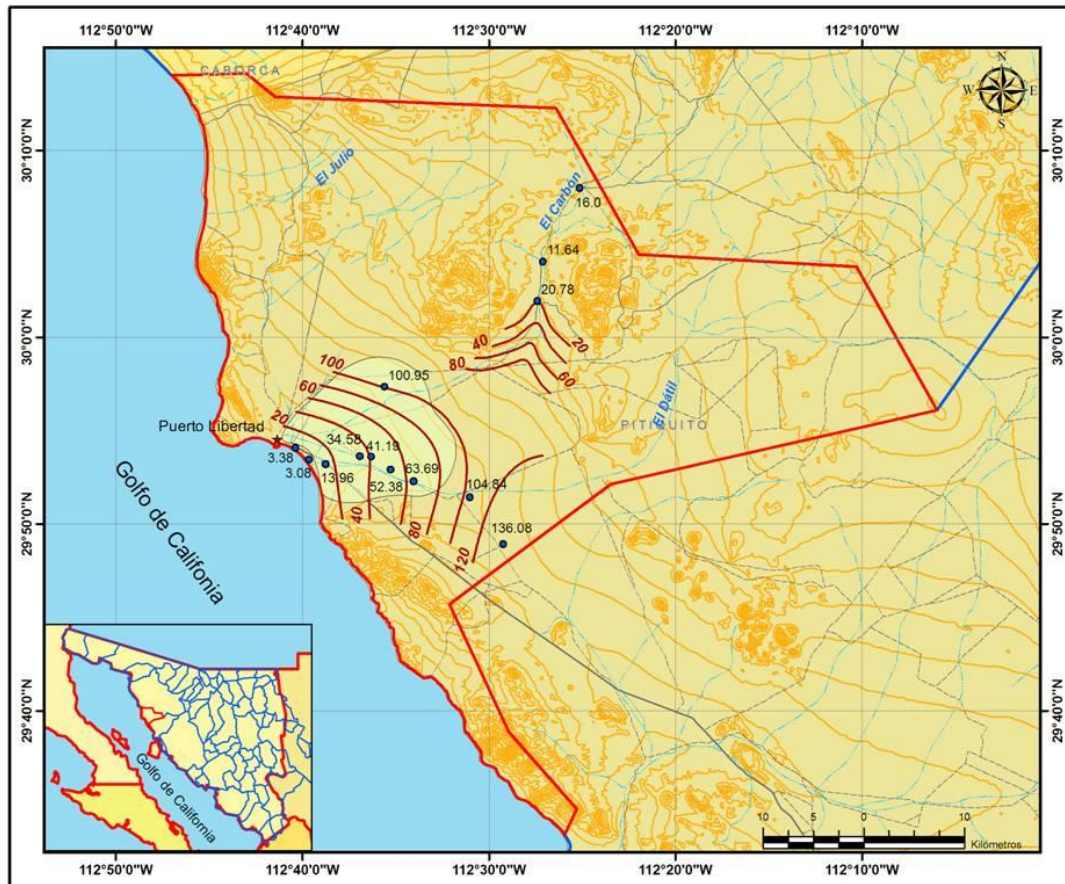


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2009)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático (2009)

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 4), se observa que sus valores, al igual que la profundidad, muestran claramente el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo tiene una dirección preferencial este a oeste en la planicie aluvial, mostrando que no se han producido alteraciones de las condiciones naturales.

Los valores registrados varían desde algunos metros, en la zona costera, hasta los 476 m.s.n.m., presentándose las menores elevaciones al sureste de Puerto Libertad y las mayores en noreste del acuífero, sobre el arroyo El Carbón. La dirección de flujo subterráneo general es similar a la del drenaje superficial, con una tendencia general noreste- suroeste y sureste – noroeste. El flujo descarga hacia el mar al sureste del poblado Puerto Libertad.

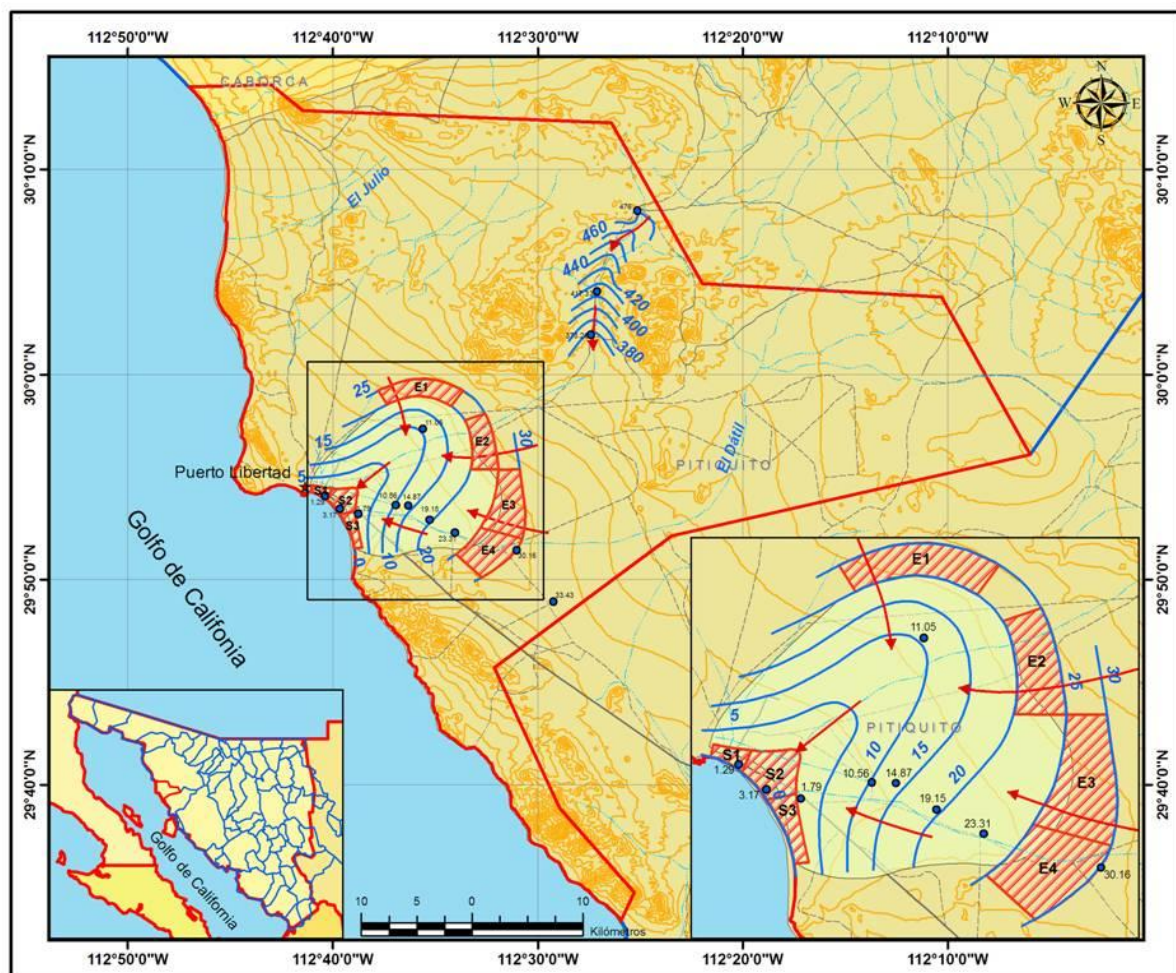


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2009)



### 5.4.3. Evolución anual del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, existe información dispersa para los años 2005, 2007 y 2009. Debido a que existe un número muy pequeño de aprovechamientos (26), sólo fue posible obtener la variación de los niveles estáticos en 7 de ellos, ubicados en la parte central del acuífero, ya que son los únicos que cuentan con mediciones al menos en dos años distintos. Tres de las captaciones presentan datos en los tres años, otras tres para los años 2005 y 2007, y una de ellas para 2005 y 2007. Dado que los años con datos son distintos y para no eliminar ninguno, se obtuvo el promedio anual individual y con ellos se elaboraron las curvas de igual valor de evolución del nivel estático (figura 5), donde se observa que en las porciones norte y centro del acuífero los niveles se han mantenido en equilibrio, ya que su variación oscila entre 0.05 a 0.20 m, en tanto que hacia el sureste se registran abatimientos puntuales que varían de 0.2 a y 1.3 m.

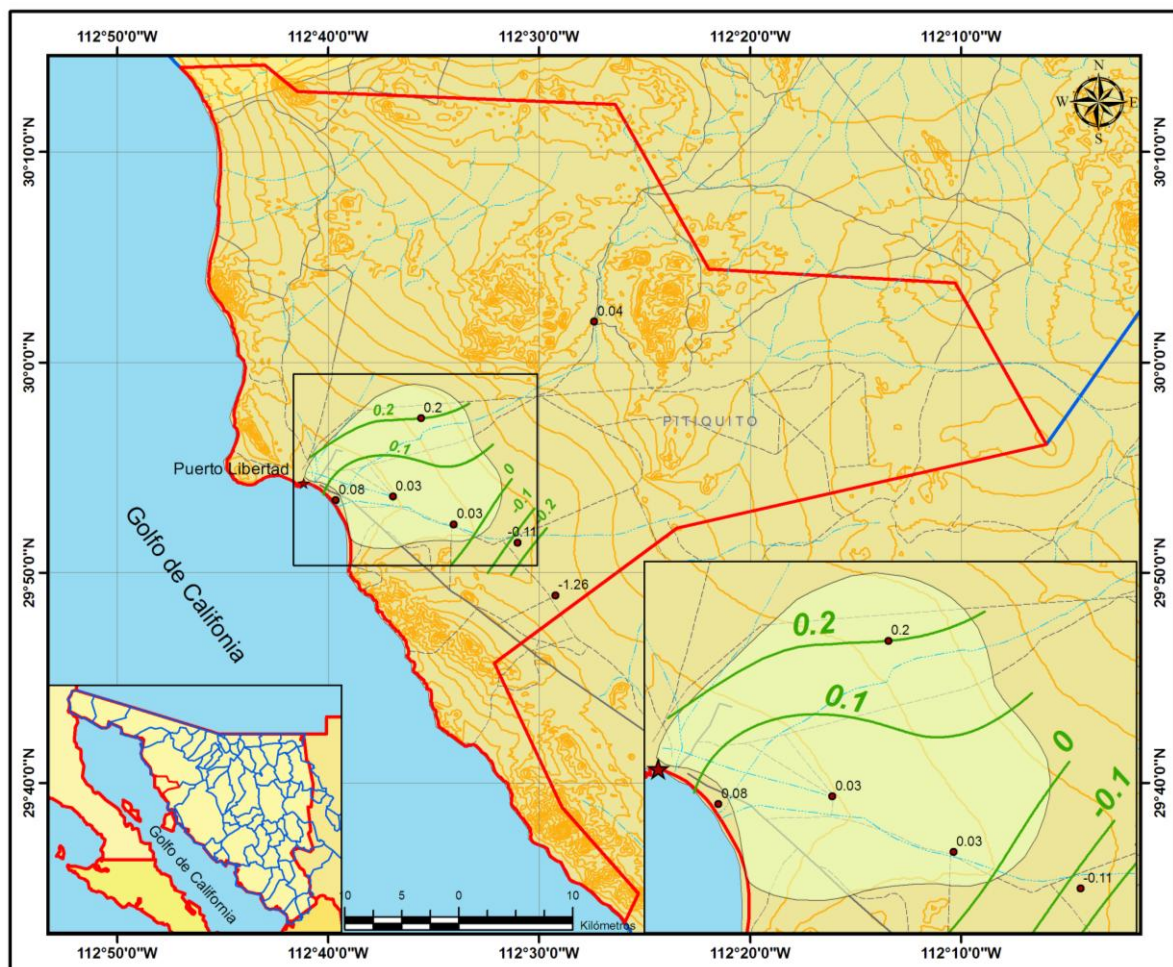


Figura 5. Evolución anual del nivel estático en m

## 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Para caracterizar la calidad química del agua subterránea, se tomó en cuenta la información que aportó los estudios realizados en 2007 y 2009 por la empresa IDEAS (2007), así como los resultados de muestreo efectuado por el Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI). Como parte de estos estudios, se tomaron muestras de agua en 10 aprovechamientos para su análisis físicoquímicos 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 físicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 200 a 2000 mg/l.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 240 a 1668  $\mu$  S/cm, con excepción de dos muestras que presentan valores de 2324  $\mu$  S/cm y 3750  $\mu$  S/cm que corresponden a agua salobre. La primera se ubica en la parte central del acuífero, al este del poblado Puerto Libertad, y la segunda en el Rancho Santa Amalia, en la porción oriental del acuífero (figura 6).

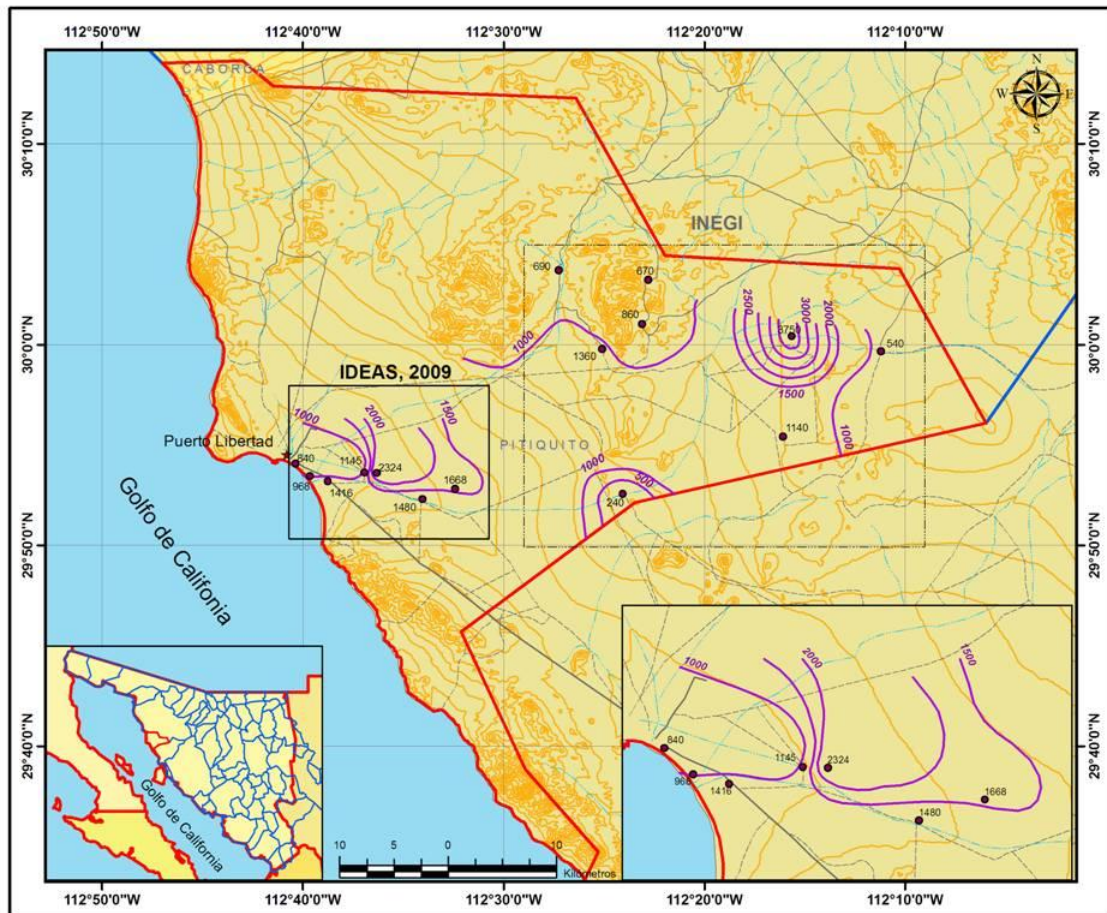


Figura 6. Curvas de isovalores de Conductividad Eléctrica ( $\mu$ S), (IDEAS, 2009 e INEGI)

La representación gráfica de los resultados de los análisis fisicoquímicos (diagramas de Piper y Stiff) refleja que la familia de agua que predomina es la Clorurada-Sódica, que corresponde a aprovechamientos cercanos a la costa, por lo que es posible que presenten mezcla con el agua de mar o que los aprovechamientos se encuentren cortando algunos horizontes evaporíticos. En menor proporción se presentan las familias Bicarbonatadas Sódica y Bicarbonatada Magnésica, las cuales representan agua de reciente infiltración pero que ha sufrido intercambio catiónico debido a la interacción con el medio geológico. Por último se obtuvieron las familias Bicarbonatada Cálcica, Bicarbonatada. Tanto en caso de las familias de aguas Bicarbonatadas como Cloruradas, se observa que el componente catiónico sigue la “Secuencia Chevotareb” ( $\text{Ca}^{++} \rightarrow \text{Mg}^{++} \rightarrow \text{Na}^+$ ), es decir la evolución geoquímica normal de las aguas subterráneas.

El aprovechamiento que se ubica en el Rancho Santa Amalia, ubicado en la porción este del acuífero, presenta concentraciones muy por encima de los Límites Máximos Permisibles para la mayor parte de los iones analizados.

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

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2009, existen en el acuífero un total de 19 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 15 se encuentran activos y los 11 restantes inactivos.

El volumen de extracción calculado es de **4.6 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 4.1 hm<sup>3</sup> (89.1 %) se destina al uso industrial (CFE) y público – urbano del poblado Puerto Libertad, 0.45 hm<sup>3</sup> (9.8 %) para uso agrícola y los 0.05 hm<sup>3</sup> restantes (1.1 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

## **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. El balance se definió en una superficie de 148.5 km<sup>2</sup>.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

## **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, 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 del 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 agua destinada al uso agrícola ( $R_r$ ), 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 ( $R_i$ ). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el volumen de agua destinado al riego agrícola es incipiente, no existe recarga inducida.

### **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 ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

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

Donde:

**$R_v$ :** Recarga vertical

**$E_h$ :** Entradas por flujo horizontal

**$B$ :** Bombeo

**$Sh$ :** Salidas por flujo horizontal

**$ETR$ :** Evapotranspiración real

**$\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### **7.1.2. Entradas por flujo 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. La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera (Fetter, 1994):

$$Q = - K A (h_1 - h_2) / L$$

Donde:

Q = Gasto, en m<sup>3</sup>/s

K = Conductividad hidráulica (m/s)

A = Área de la sección transversal por donde pasa el flujo, en m<sup>2</sup> (A = B\*b)

h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> = Cargas hidráulicas (m)

L = Distancia entre curvas de igual valor (m), o en su caso distancia entre piezómetros

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.

El coeficiente K, se obtiene a partir de las pruebas de bombeo. Éstas arrojan un valor de transmisividad (T), que es el producto de la conductividad hidráulica (K) por el espesor saturado:

$$T = K b$$

Siendo A (área de sección transversal de la celda) = B (ancho de la celda) \* b (espesor saturado), la ecuación de Darcy, queda de la siguiente manera:

$$Q = - T B (h_1 - h_2) / L$$

De acuerdo con la configuración del nivel estático para el año 2009, mostrada en la figura 4, el cálculo del flujo en las celdas de entradas se muestra en la tabla 4, en la que se puede observar que su valor total asciende a **6.6 hm<sup>3</sup> anuales**. Se utilizó el valor de conductividad hidráulica (K) de 5x10<sup>-5</sup> m/s, obtenido en la pruebas de bombeo realizadas en el estudio de IDEAS, 2009 (realizado para la Comisión Nacional del Agua), y por correlación de las unidades hidrogeológicas entre el acuífero Puerto Libertad y el acuífero Arroyo Sahuaro se ajustó su valor para el espesor saturado. En las celdas de entrada se consideró un espesor saturado (b) de 80 m, obtenido de las secciones hidroestratigráficas.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

CANAL	Longitud B (m)	Ancho a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	b (m)	K	T (m <sup>2</sup> /s)	Caudal	Volumen (hm <sup>3</sup> /año)
						(m/s)		Q (m <sup>3</sup> /s)	
E1	6132	1571	5	0.0032	80	5x10 <sup>-5</sup>	0.004	0.0781	2.5
E2	4741	1856	6	0.0032	80	5x10 <sup>-5</sup>	0.004	0.0613	1.9
E3	5944	2487	5	0.002	80	5x10 <sup>-5</sup>	0.004	0.0478	1.5
E4	3927	3555	5	0.0014	80	5x10 <sup>-5</sup>	0.004	0.0221	0.7
<b>Total entradas</b>									<b>6.6</b>



## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y la evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de 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 **4.6 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.2. Salidas por flujo 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 4) 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	Longitud B (m)	Ancho a (m)	h2-h1 (m)	Gradiente i	b (m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	1528	731	2.5	0.0034	50	5x10 <sup>-5</sup>	0.0025	0.0131	0.4
S2	2444	1901	2.5	0.0013	70	5x10 <sup>-5</sup>	0.0035	0.0112	0.4
S3	3276	761	2.5	0.0033	60	5x10 <sup>-5</sup>	0.003	0.0323	1
Total salidas									1.8

El resultado indica que el volumen total de salidas subterráneas asciende a **1.8 hm<sup>3</sup>/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) es un parámetro 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) =	21.3		
P(mm) =	107.6	P <sup>2</sup> =	11577.76
L =	1315.67985	L <sup>2</sup> =	1731013.47
ETR (mm)	113.0		

Sin embargo, debido a que el valor de la precipitación media anual es muy bajo, no se pueden aplicar los métodos empíricos para la estimación de ETR.

La limitación teórica para la utilización de esta fórmula es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. Entonces debido a que la precipitación (107.6 mm) resultó menor que la relación 0.31L = 407.8, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor al valor de la precipitación.

El fenómeno presente en el área en la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith, 1973 (figura 9).

Su valor se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE < a 2 m) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (2264 mm). El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático. De la figura 9 se deduce que para una profundidad al nivel estático (PNE) de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%. Considerando una superficie de 6.0 km<sup>2</sup> donde la PNE es menor a los 3 m y un 2% de la evaporación potencial, se tiene que la evaporación es del orden de los **0.3 hm<sup>3</sup> anuales** (tabla 5).

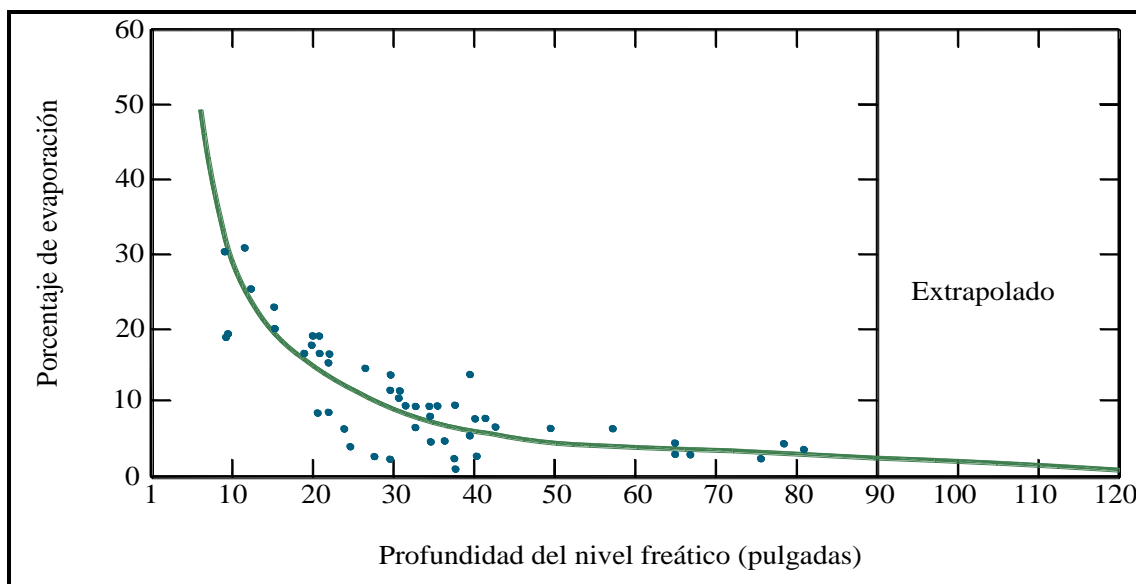


Figura 9. Evaporación del agua Subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático según White

Tabla 5. Cálculo de la evapotranspiración real

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km <sup>2</sup> )	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm <sup>3</sup> /año)
2.26	6.00	0.02	0.30

### 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:

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

En donde:

$\Delta V$  = 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, dado que el depósito aluvial está constituido por gravas y arenas, se considera un valor de  $S = 0.1$ . El detalle del cálculo del volumen de cambio de almacenamiento, se muestra en la tabla 6. El volumen que ha ganado anualmente el acuífero, es de **1.5 hm<sup>3</sup>**.

Tabla 6. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento

Evolución anual (m)	S	Area (km <sup>2</sup> )	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
0.25	0.1	19.6	0.5
0.15	0.1	43.2	0.6
0.05	0.1	78.6	0.4
	Evolución anual (hm <sup>3</sup> ) =		1.5

### Solución de la ecuación

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 (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$Rv = Sh + B + ETR - Eh + \Delta V(S)$$

Sustituyendo valores:

$$Rv = 1.8 + 4.6 + 0.3 - 6.6 + 1.5$$

$$Rv = 1.6$$

Por lo tanto la recarga total es igual a  $Rt = Rv + Eh$

$$Rt = 1.6 + 6.6$$

$$Rt = 8.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en la unidad hidrogeológica.

Rt = Recarga total media anual.

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA.

### **8.1. Recarga total media anual (Rt)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **8.2 hm<sup>3</sup>/año (8.159286 hm<sup>3</sup>/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.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **1.3 hm<sup>3</sup> anuales** que corresponde al 75% del volumen total de salidas horizontales, que deben mantenerse para hacer frente a la intrusión marina.

La intrusión marina fue detectada y configurada por medio de los sondeos geofísicos, se encuentra por debajo de 45 m de profundidad en la línea de costa, lo anterior fue confirmado con un pozo perforado en el año 2008 a 33 m de profundidad (IDEAS, 2009), que presenta agua dulce en toda su columna menor a 930 µS/cm de conductividad eléctrica. Por lo tanto, se considera que es posible utilizar la cuarta parte del volumen de salidas horizontales sin generar afectación ecológica.

### **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 2009**, es de **5,423,944 m<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. De acuerdo a la expresión (3), se tiene que:

$$\text{DAS} = 8.2 - 1.3 - 5.423944$$

$$\text{DAS} = 1.476056 \text{ hm}^3 / \text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **1'476,056 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, 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).

INEGI, 2000. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora.

Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS) – CIBNOR, 2007. Estudio de evaluación geohidrológica del Acuífero Puerto Libertad, Sonora. Como parte del estudio: Implementación de una estrategia de uso de agua producida por el proceso de producción de etanol.

Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS) – BIOFIELDS, 2008. Estudio de factibilidad hidrogeológica, Nivel 2: Estudio hidrogeológico alcance semidetalle, predio Biofields.

Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS) – BIOFIELDS, 2009. Estudio de integración y caracterización hidrológica superficial y subterránea del sistema ambiental regional y el predio del proyecto Sonora Fields, Municipio de Pitiquito, Sonora.

UNIVERSIDAD DE SONORA – CONAGUA, 2005. Elaboración de Atlas de aguas subterráneas para el Estado de Sonora y diseño de una red de monitoreo piezométrico.

UNIVERSIDAD DE SONORA – CONAGUA, 2006. Estudio de caracterización Físicoquímica y Piezometría de los Acuíferos Costeros de la Región Noroeste.

UNIVERSIDAD DE SONORA – CONAGUA, 2007. Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de aguas subterráneas para su desalación en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte Mayo, Sonora.