



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAHUARAL (2620) ESTADO DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincias fisiográficas.....	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía	8
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA.....	9
4.1	Estratigrafía.....	11
4.2	Geología estructural	13
4.3	Geología del subsuelo	14
5	HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1	Tipo de acuífero	15
5.2	Parámetros hidráulicos.....	15
5.3	Piezometría	16
5.4	Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1	Profundidad al nivel estático	17
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3	Evolución anual del nivel estático	19
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	22
7.1	Entradas	23
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3	Retornos de riego (Rr)	25
7.2	Salidas.....	26
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	26
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	26
8	DISPONIBILIDAD	27
8.1	Recarga total media anual (R).....	27
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	27
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	28
9	BIBLIOGRAFÍA	29

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua. -

Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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

1.1 Localización

El acuífero Sahuaral, definido con la clave 2620 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroeste del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 27°59' y 28°34' de latitud norte, y 110°57' y 111°27' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,495 km² (figura 1).

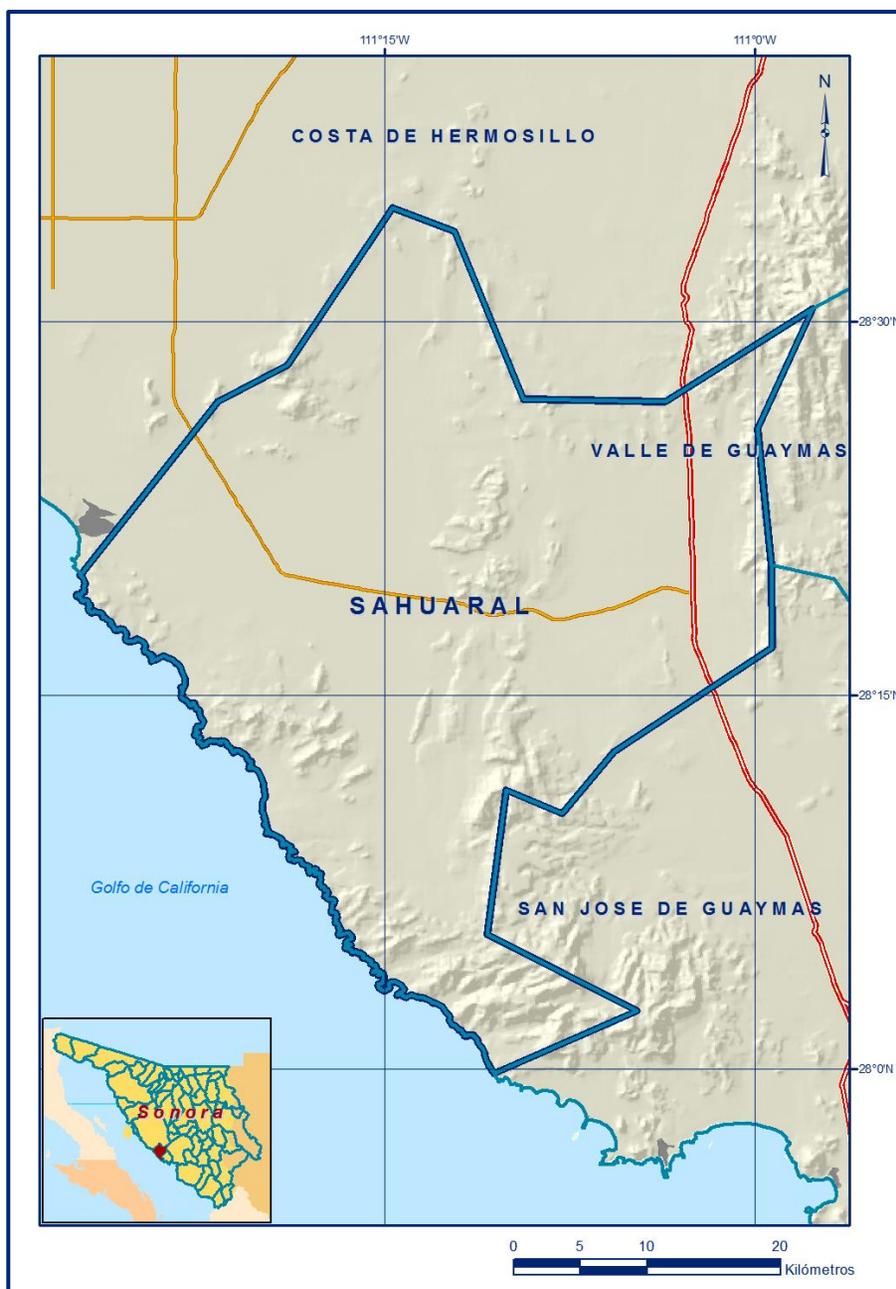


Figura 1. Localización del acuífero

Colinda al oeste con el Golfo de California; al norte colinda con el acuífero Costa de Hermosillo, al este con el acuífero Valle de Guaymas, al sureste con el acuífero San José de Guaymas, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora.

Geopolíticamente, el acuífero abarca parcialmente a los municipios de Guaymas y Hermosillo. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2620 SAHUARAL							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	111	27	19.6	28	39	50.0	
2	111	21	47.4	28	26	47.6	
3	111	19	56.2	28	28	15.4	
4	111	14	41.8	28	34	33.5	
5	111	12	10.4	28	33	37.0	
6	111	9	23.2	28	26	52.1	
7	111	3	38.8	28	26	47.6	
8	110	57	39.5	28	30	29.8	
9	110	59	54.0	28	25	42.6	
10	110	59	19.5	28	20	12.5	
11	110	59	17.5	28	16	53.3	
12	111	5	43.1	28	12	42.7	
13	111	7	48.2	28	10	13.9	
14	111	10	4.9	28	11	11.0	
15	111	10	51.1	28	5	23.5	
16	111	4	46.7	28	2	19.6	
17	111	10	34.5	27	59	48.7	DEL 17 AL 1 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	111	27	19.6	28	39	50.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Sahuaral pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda. El primero en la porción norte y es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos de la Zona de Cieneguillas, Son.”*, publicado el en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de octubre de 1956. Este decreto es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El segundo en la porción central y es el *“Decreto por el que se amplía el Distrito Nacional de Riego de la Costa de Hermosillo, Estado de Sonora”*, que fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de marzo de 1963. Esta veda es tipo I, en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

Por último la porción sur del acuífero que se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Son.”* publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967.

Este decreto es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite la extracción para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El usuario principal del agua es el agrícola.

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

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

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DEL SAHUARAL, SONORA. GEOCALLI CONSULTORES S. A., elaborado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos, en 1978. Las conclusiones más importantes del estudio son las siguientes: el acuífero del Valle del Sahuaral se encuentra constituido por una interdigitación de arcillas, arenas y gravas; el volumen de extracción anual de los pozos existentes es superior a los 150 hm³ y de acuerdo a los aforos realizados; los caudales de los pozos son superiores a los 80 lps, con caudales específicos superiores a los 10 lps; el volumen de agua almacena por el acuífero es de 10,080 hm³, considerando un área de 400 km² hasta una profundidad de 250 m, con una profundidad media al nivel estático para octubre de 1978 de 40 m y un coeficiente de almacenamiento de 0.12.

ESTUDIO DE LA INTRUSIÓN SALINA EN LA FRANJA COSTERA EN EL VALLE DE HERMOSILLO Y EL SAHUARAL, SONORA, elaborado por la Universidad Nacional Autónoma de México, en 1997. En el estudio se realizaron 51 sondeos eléctricos verticales con arreglo tipo Schlumberger, por medio de los cuales fue posible definir que el nivel freático presenta una superficie ondulada como producto de las variaciones en la permeabilidad de las capas someras.

Esta zona presenta resistividades iguales o mayores a los 100 Ω -m. La zona con resistividades menores a los 5 Ω -m corresponden a las regiones acuífero invadido por el agua de mar y las zonas con resistividades hasta 25 Ω -m como la zona de interface.

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 segundo estudio y las bases de datos del resto, 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 Provincias fisiográficas

Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI 2000), el acuífero El Sahuaral se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Llanura Sonorense y en la subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses, la cual está formada por sierras bajas separadas por llanuras.

En ellas predominan rocas ígneas intrusivas ácidas, aunque también son importantes las rocas lávicas, metamórficas, calizas antiguas y conglomerados del Terciario.

Las pendientes son bastante abruptas, siendo frecuentes las mayores de 45 grados, especialmente en las rocas intrusivas, lávicas y metamórficas, en tanto que las menores a 20 grados son raras.

Los arroyos que drenan esta región efectúan una fuerte erosión produciendo espolones laterales que se proyectan en las llanuras. Las formas fisiográficas que predominan son *Gran Bajada con Lomerío*, *Sierra Escarpada Compleja* y *Llanura Aluvial Salina*, las cuales ocupan el 46%, 30% y 11% del área total del acuífero, respectivamente. En el resto del área se presentan las siguientes fisioformas: *Meseta Basáltica con Sierra* (7%), *Lomerío complejo* (4%), *Abanico Aluvial* (1%) y *Llanura Deltaica Salina* (1%).

3.2 Clima

Los climas que prevalecen en la región según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), para las condiciones de la República Mexicana, son los siguientes:

BW (h') hw. Es el tipo de clima predominante, pues se manifiesta en el 55% del acuífero. Es muy seco, con régimen de lluvias en verano, con lluvia invernal entre 5% y 10.2%, se presenta en el centro-este y sur del acuífero.

BW (h') hw (x'). Se ubica en el noroeste del acuífero ocupando el 38% del área. Es muy seco, con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 %.

BW hw. Este clima es muy seco con régimen de lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 %, y representa el 7 % del área total del acuífero, localizándose al este y sur.

Para el análisis climatológico, se consideró la información de dos estaciones climatológicas, administradas por la Comisión Nacional del Agua: San Isidro y Empalme. Ninguna de ellas se encuentra dentro del área del acuífero, pero fueron consideradas por ser las más cercanas y las que presentan mayor cantidad de información climatológica.

La temperatura media anual en el acuífero es de 24.4°C. La temperatura media máxima anual en la estación San Isidro es de 22.5 °C, mientras que en Empalme es de 25.2 °C, y se registra en los meses de julio y agosto. Las temperaturas medias mínimas se presentan en diciembre y enero, con 4.5 °C y 4.4 °C, respectivamente.

El tipo de lluvias en el área es característica de invierno y verano, similar a la mayor parte de la región noroccidental del país. En invierno la precipitación es frontal, debido a las masas de aire polar que intrusionan a las de aire semi-tropical existente.

En verano la lluvia es una conjugación de tipo orográfico y por convección, debido a su posición fisiográfica; así la lluvia es de carácter chubasco, de gran intensidad y corta duración.

Con base en el análisis climatológico se obtuvo un valor medio anual de precipitación en el acuífero de 248.9 mm, con la mayor lámina en los meses de agosto y septiembre, en los que se alcanzan 64.8 mm y 57.1 mm, respectivamente. El valor mínimo de lluvia se registra en los meses de abril (1.1 mm) y mayo (0.6 mm). En la estación San Isidro la precipitación media anual es de 178.0 mm, mientras que en la estación Empalme es de 280.9 mm.

Los valores correspondientes a la evaporación potencial fueron tomados únicamente de la estación San Isidro, ya que no fue posible obtener datos de Empalme. La evaporación potencial media anual en el acuífero es de 2217.3 mm, con las mayores láminas en los meses de mayo a agosto, período en que las evaporaciones son superiores a los 75 mm mensuales. La evaporación más alta se registra en el mes de julio, con 87.0 mm, mientras que la evaporación mensual mínima se presenta en enero, 27.8 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero Sahuaral se encuentra en la Región Hidrológica 9 “Sonora Sur”, formando parte de la cuenca del Río Sonora y de la subcuenca Arroyo La Bandera. Dado que la cuenca baja del Río Sonora es árida, los escasos volúmenes que escurren generalmente se infiltran en las zonas arenosas antes de llegar a su desembocadura en el Golfo de California, de modo que prácticamente no existen aprovechamientos de aguas superficiales.

Al presentarse las escasas precipitaciones, el agua escurre hacia 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 muy reducidos.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo, 1990), el acuífero Sahuaral presenta diversas formas morfológicas, donde predominan los lomeríos estables (Lo E) y metaestables (Lo M); planicies aluviales (Pl al) y costeras (Pl C); piedemonte estables (Pi E) y metaestables (Pi M); y por último las laderas montañosas altas (Ma) y bajas (Mb).

En general, los lomeríos están constituidos por rocas volcánicas ácidas a intermedias, rocas plutónicas y conglomerados con edades que varían desde el Cretácico Superior, Terciario y Cuaternario. Las planicies se caracterizan por la presencia de gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario. Los piedemonte poseen rocas volcánicas ácidas a intermedias y rocas plutónicas, del Cretácico Superior, Terciario y Cuaternario. Las laderas montañosas están constituidas por rocas volcánicas intermedias y ácidas del Terciario.

4 GEOLOGÍA

La geología regional se conforma por unidades que varían en edad desde el Paleozoico hasta el Reciente (figura 2), predominando las rocas volcánicas de composición intermedia-ácida (andesitas a riolitas).

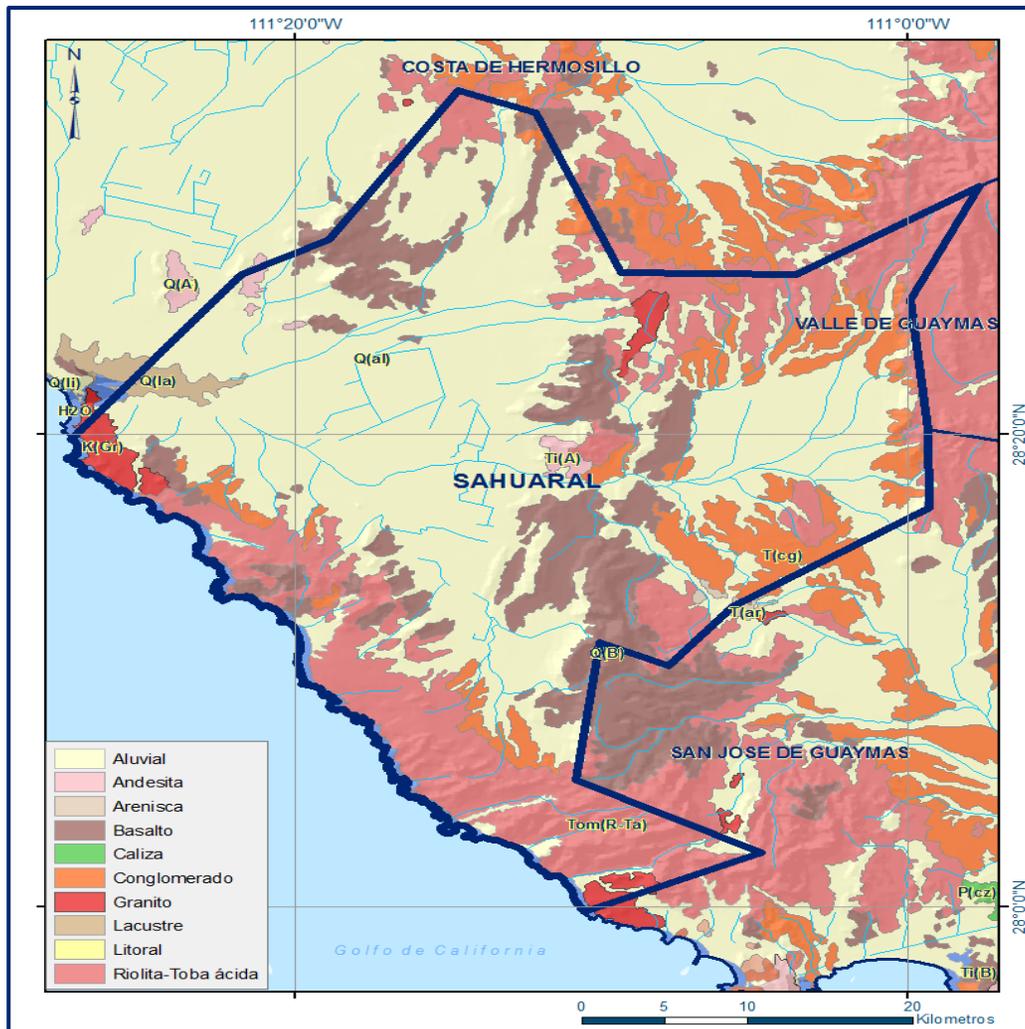


Figura 2. Geología del acuífero

Las rocas más antiguas están representadas por secuencias carbonatadas que se constituyen por una intercalación no rítmica de calizas, dolomías, areniscas y lutitas que fueron depositados en ambientes de cuenca profunda, ya que a diferencia de las secuencias carbonatadas depositadas en ambientes de plataforma, éstas últimas poseen abundante contenido fósil que se asocia a ambientes marinos de poca profundidad.

Las rocas que representan al período Mesozoico están compuestas mayormente por grandes cuerpos ígneos intrusivos de composición ácida (granito-granodiorita) aunque dentro del acuífero ocurren solamente algunos afloramientos dispersos y fuertemente denudados.

El Cenozoico está representado por secuencias de rocas volcánicas y sedimentos clásticos continentales.

Particularmente, el Oligoceno está representado por tobas riolíticas, riolitas e ignimbritas que se asocian a la construcción de la Sierra Madre Occidental, aunque dentro del acuífero solamente ocurren masas dispersas de rocas correlacionables con este evento petrotectónico.

Posteriormente, durante el Mioceno, ocurre un fuerte evento de distensión que ocasiona una fuerte extensión cortical que genera grandes fosas tectónicas y bloques levantados, mismos que al fracturarse y denudarse, depositan sus sedimentos clásticos en el interior de estas fosas estructurales para formar los sedimentos de la Formación Báucarit, los cuales se componen por conglomerados polimícticos, areniscas y ocasionalmente derrames de composición basáltica.

Posteriormente, en el Mioceno Superior se emplazan grandes volúmenes de rocas volcánicas de composición intermedia-ácida (andesitas-dacitas, traquitas, tobas riolíticas y riolitas) que dan lugar a la Formación Lista Blanca, algunos de ellos coronados por basaltos del Mioceno Tardío, localizándose hacia la porción sur en las sierras Tinaja del Carmen y en el Valle de Guaymas, en las sierras Santa Úrsula y Bacatete.

Estas rocas volcánicas están afectadas por intrusivos terciarios posiblemente del Mioceno, constituidos por rocas micrograníticas subvolcánicas que afloran hacia los flancos de la sierra Santa Úrsula en su porción meridional.

Finalmente, en el Cuaternario se tienen conglomerados polimícticos generados en ambientes aluviales rellenando los grandes valles y planicies costeras en la costa agrícola de Hermosillo y Valle de Guaymas al norponiente y sur respectivamente, y depósitos lacustres y eólicos al extremo poniente, paralelamente siguiendo la línea de costa.

4.1 Estratigrafía

El registro estratigráfico de la región abarca del Mesozoico al Reciente. Las unidades se describen a continuación de la más antigua a la más reciente:

Paleozoico

El Paleozoico corresponde a la unidad más antigua de la región. Se caracteriza por rocas sedimentarias principalmente carbonatadas con edades que van del Devónico al Pérmico y afloran principalmente en la porción oriental del acuífero, fuera de sus límites administrativos. En otros afloramientos de rocas similares, fuera del área del acuífero Sahuaral, se encontraron fragmentos fósiles del Paleozoico Superior. El intervalo Devónico-Pérmico consiste de secuencias estratificadas depositadas en un ambiente marino muy somero y de plataforma continental. Están constituidas de caliza, arenisca, caliza arcillosa, conglomerado, lodolita y dolomía. Las rocas del Devónico se presentan en capas de espesor delgado a mediano que contienen abundante fauna de estromatopóridos (*Amphipora* sp. y *Actinostroma* sp.), briozoarios, corales y braquiópodos silicificados del Devónico Superior.

Cretácico Superior-Paleoceno

El Cretácico Superior- Paleoceno se presenta en el cerro La Morada y al noreste del cerro El Testerazo, en donde afloran secuencias vulcanosedimentarias de andesitas y tobas andesíticas (KsA-TA) que presentan una incipiente alteración propiolítica.

Estas unidades se diferencian fácilmente de las unidades circundantes más recientes por sus afloramientos poco abruptos.

Por otro lado, al sur del estero Tastiota y al norte del cerro La Chiche, dentro de los límites administrativos del acuífero, ocurren amplios afloramientos de cuerpos intrusivos del Cretácico Superior-Paleoceno (KsTpaGr-Gd) de composición granítica-granodiorítica que por lo general son cubiertas por unidades volcánicas y volcanoclásticas más recientes, sin embargo, al noreste del cerro El Testerazo ocurren con relación cortante sobre las unidades volcánicas andesíticas del Cretácico Superior.

Terciario – Mioceno

Las unidades volcánicas emplazadas durante el Mioceno representan las unidades de mayor distribución espacial y construyen el contexto geológico regional (Mora-Álvarez, 1992). Diversos autores que han trabajado estas zonas (Till et al., 2007; Mora-Álvarez, 1992; Mora-Álvarez y McDowell, 2000), han definido que las secuencias volcánicas de composición dacítica-riolítica del Mioceno (TmA-Da y TmTR-R), son una expresión de un cambio de régimen tectónico compresivo (subducción) a un régimen extensivo (Basin and Range), sin embargo, es un volcanismo con características químicas y mineralógicas que muestran que aún existía influencia de los procesos de subducción.

La unidad basáltica del Mioceno (TmB) es de amplia ocurrencia dentro del acuífero y se distingue muy fácilmente por que desarrolla elementos geomorfológicos típicos (mesetas ligeramente basculadas al W-NW) y su coloración es en tonos oscuros. Estas rocas son basaltos y brechas basálticas que son posteriores a las unidades volcánicas dacíticas-riolíticas, a las cuales cubren en discordancia.

La unidad representada por conglomerado polimíctico y arenisca del Mioceno (TmCgp-Ar) por lo general está asociada a los procesos tectónicos de extensión que afectan a los afloramientos rocosos pre-Mioceno, los cuales son erosionados según la tasa de subsidencia estructural regional. Por lo general, se puede correlacionar cronoestratigráficamente con la Formación Báucarit, la cual es de amplia ocurrencia en el centro del Estado.

Cuaternario Pleistoceno-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, con lo cual su característica más notoria es que se componen de conglomerados – brecha granulométricamente mal clasificados y compuestos en su mayoría por clastos angulosos cuya composición varía según la zona de la cual derivan.

La unidad Qholm-ar ocurre principalmente en las llanuras intermontanas y en las planicies costeras y aunque su distribución es muy amplia, su ambiente de depósito no es muy claro ya que pueden corresponder con depósitos aluviales – fluviales o 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.

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

4.2 Geología estructural

Los distintos eventos tectónicos han generado sistemas estructurales que se sobre imponen y conjugan. Así, el análisis de los rasgos fisiográficos y geomorfológicos principales permite observar en términos generales afloramientos alargados y orientados NNW-SSE separados por amplias planicies aluviales y eólicas.

Esta distribución está controlada por estructuras 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 presentan en las Sierras Santa Úrsula y Tinaja del Carmen. Es muy notorio que con respecto a la situación estructural del estado de Sonora, en el área que abarca el acuífero El Sahuaral, ocurren abundantes estructuras con una orientación N-S y buzamientos al W, evidencia de la zona de influencia estructural de la Provincia Extensional del Golfo.

La presencia de abundantes rocas volcánicas, habla de una corteza fuertemente tectonizada, considerando que para el ascenso de estos líquidos es necesario un medio propicio y con presencia de estructuras (fallas) profundas. Incluso es claramente observable que algunas unidades volcánicas tienen un modo de emplazamiento controlado por estructuras, como puede ser visto en los cerros El Testerazo y La Panocha. Estas relaciones cortantes mediante estructuras limítrofes primarias pueden ser observadas en la distribución cartográfica de los intrusivos de composición granítica-granodiorítica del Cretácico Superior-Paleógeno, ya que se muestran seccionados bajo las mismas condicionantes que las secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con los resultados de las exploraciones geofísicas realizadas por la empresa Geocalli S. A. en 1978, quien ejecutó 51 sondeos eléctricos verticales (SEV´s) en la parte central – oeste del acuífero, donde se localiza la zona de mayor extracción de aguas subterráneas, es posible definir la presencia de un acuífero conformado en la parte superior por depósitos aluviales con espesores desde 10 m hasta 260 m.

La parte inferior está compuesta por rocas volcánicas fracturadas con espesores entre 100 y 400 m.

La unidad aluvial se encuentra saturada de agua salada-salobre y en menor proporción de agua dulce.

Con la información obtenida en los SEV´s se construyeron cinco secciones geoelectricas que fueron correlacionadas con la información geológica en el estudio realizado por IDEAS (2009) para definir cinco secciones hidroestratigráficas: una paralela a la costa, con una dirección NW-SE, de 9 km de longitud; y las cuatro secciones restantes con una orientación NE-SW y longitudes de 5 a 14 km.

En la figura 3 se presenta la sección de mayor longitud, ubicada en la parte central del acuífero.

En ella se observa la presencia de cuatro unidades: la unidad I, constituida por limos, arenas y depósitos aluviales, no saturada y un espesor menor a los 100 m; la unidad II, que es continuación de la anterior, solo que se encuentra semiconsolidada, saturada de agua salobre y salada y presenta un espesor de 40 m hasta más de 260 m.

La unidad III, que corresponde al mismo material de las unidades anteriores, pero saturada de agua dulce, distribuyéndose en la parte norte del acuífero, y que corresponde a su zona de recarga, con espesores menores a 200 m.

La unidad IV, que es la que se encuentra a mayor profundidad y se constituye por rocas volcánicas fracturadas que conforman la zona montañosa que rodea a todo el valle, integrada por derrames volcánicos andesíticos, tobas andesíticas interestratificadas con algunos sedimentos, flujos de andesitas - dacitas, traquitas, tobas riolíticas y basaltos, presentando un espesor de 400 m.

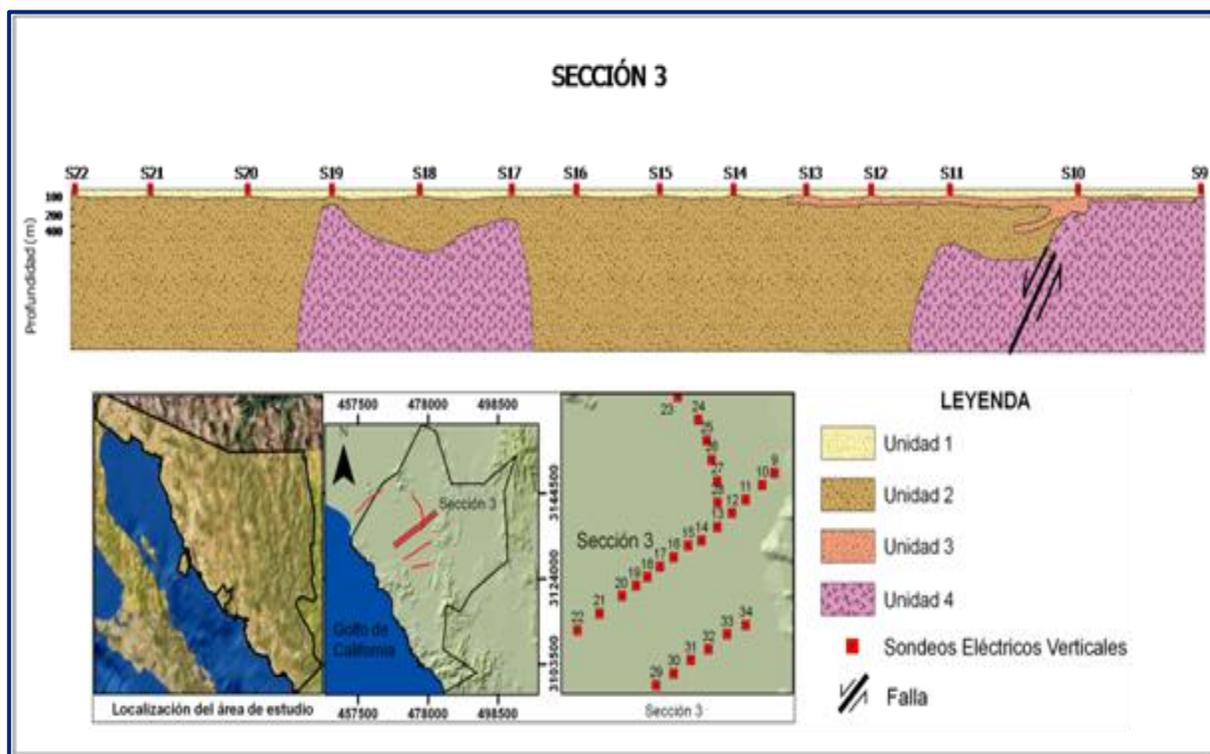


Figura 3. Sección hidroestratigráfica NE – SW (IDEAS 2008, modificado de GEOCALLI, 1978)

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero es de **tipo libre**, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento, constituido en su parte superior, por una secuencia de depósitos aluviales que corresponden a limos y arenas no consolidadas y semiconsolidadas, de alta permeabilidad, que contienen horizontes de agua salada – salobre y agua dulce. Su explotación se localiza principalmente en la región centro – oeste, donde presenta mayor espesor.

Debajo de esta secuencia, el acuífero está conformado por una secuencia de rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2 Parámetros hidráulicos

De los resultados obtenidos en 24 pruebas de bombeo, realizadas por Geocalli S. A. en 1978, de las cuales 9 se realizaron en abatimiento y recuperación, se observa que los valores de transmisividad varían entre **0.004 y 0.130 m/s** y de coeficiente de almacenamiento de **0.0002 y 0.053** (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo (GEOCALLI, 1978)

Pozo	Nivel Estático (m)	Nivel Dinámico (m)	Caudal (lps)	$T \times 10^{-3}$ (m^2/s)	Etapas	Interpretación	S
S6	13.81	35.05	151.6	30.8	Abatimiento	Jacob	
S6	13.81	35.05	151.6	10	Recuperación	Jacob	
S6-OBS	12.62	13.24	0	61.6	Abatimiento	Jacob	0.05
S6-OBS	12.62	13.24	-	55.4	Recuperación	Jacob	
S12	39.36	49.03	67.3	21.6	Recuperación	Jacob	
S12	39.36	49.03	67.3	20.5	Abatimiento	Jacob	
S15	53.6	66.1	70	4	Recuperación	Hantush	
S15	53.6	64.44	70	38.8	Abatimiento	Jacob	
S17	53.07	68.72	34	16.3	Recuperación	Jacob	
S18	50.74	57.78	72.7	26.9	Recuperación	Hantush	
S19	57.76	72.3	84.2	4.8	Recuperación	Hantush	
S21	53.67	62.7	73	95.4	Recuperación	Jacob	
S21	53.67	60.46	73	121.4	Abatimiento	Jacob	
S24	76.2	92.3	87	54.9	Recuperación	Jacob	
S27	68.93	70.12	95.4	124.7	Recuperación	Jacob	
S29	66.93	72.83	106.7	130.1	Abatimiento	Jacob	
S31	61.49	68.58	81.4	74.4	Recuperación	Jacob	
S34	63.45	67.63	95.4	69.9	Recuperación	Jacob	
S35	59.95	70.02	84.2	66.9	Recuperación	Jacob	
S35	59.95	69.95	84.2	70	Abatimiento	Jacob	
S38	73.4	80.72	41.3	20.4	Recuperación	Jacob	
S50	34.22	53.76	137.5	25.2	Recuperación	Jacob	
S50	34.22	52.92	137.5	12.2	Abatimiento	Jacob	
S55	45.63	81	101	3.6	Recuperación	Jacob	
S57	43.64	59.53	134.7	21.4	Abatimiento	Jacob	
S57	43.64	59.53	134.7	30.8	Recuperación	Jacob	
S63	55.26	58.42	89.8	29.9	Recuperación	Jacob	
S63-OBS	53.73	56.3	-	19.3	Recuperación	Jacob	
S63-OBS	53.73	56.03	-	19.3	Abatimiento	Jacob	0.0002
S64	58.62	63.69	14.4	7.6	Recuperación	Jacob	
S66	48.71	63.76	10	4.5	Abatimiento	Hantush	
S70	60.24	76.31	7.5	96	Recuperación	Jacob	
S72	72.97	103.5	3.1	11.7	Recuperación	Jacob	

T = Transmisividad S = Coeficiente de almacenamiento

5.3 Piezometría

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

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2009 (figura 4), los valores en el acuífero Sahuaral varían entre 13 y 87 m. Las menores profundidades se encuentran en la parte noroeste, con valores entre 13 m y 30 m; y las mayores se ubican en la porción centro - sur, con valores entre 70 y 87 m. El resto de las profundidades se encuentran entre 30 y 60 m, distribuidas generalmente en el centro, oeste y este del acuífero.

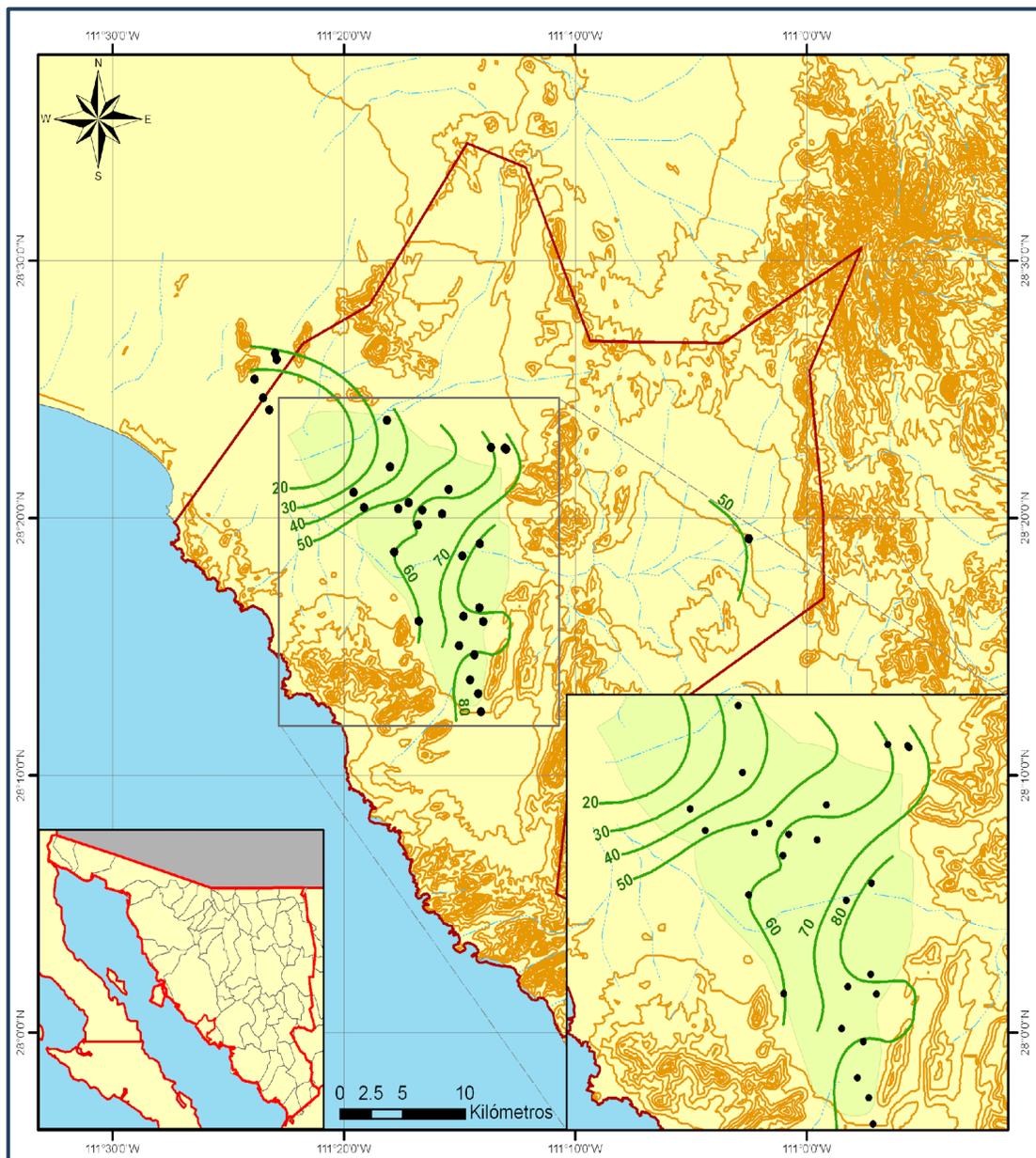


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 5), se observa que sus valores se encuentran entre -5 y -35 msnm. Las mayores se encuentran en el centro-sur del acuífero y las menores al noroeste. Todas las elevaciones del nivel estático que se obtuvieron se encuentran por debajo del nivel del mar, a excepción de una que se ubica en la parte este del acuífero, en el predio de Los Arrieros, de modo que la dirección principal de flujo es hacia el centro del acuífero, donde se manifiesta un gran cono de abatimiento producto del bombeo excesivo al que ha sido sometido el acuífero y a la lenta estabilización de los niveles, debido a la presencia de capas de baja permeabilidad en la zona.

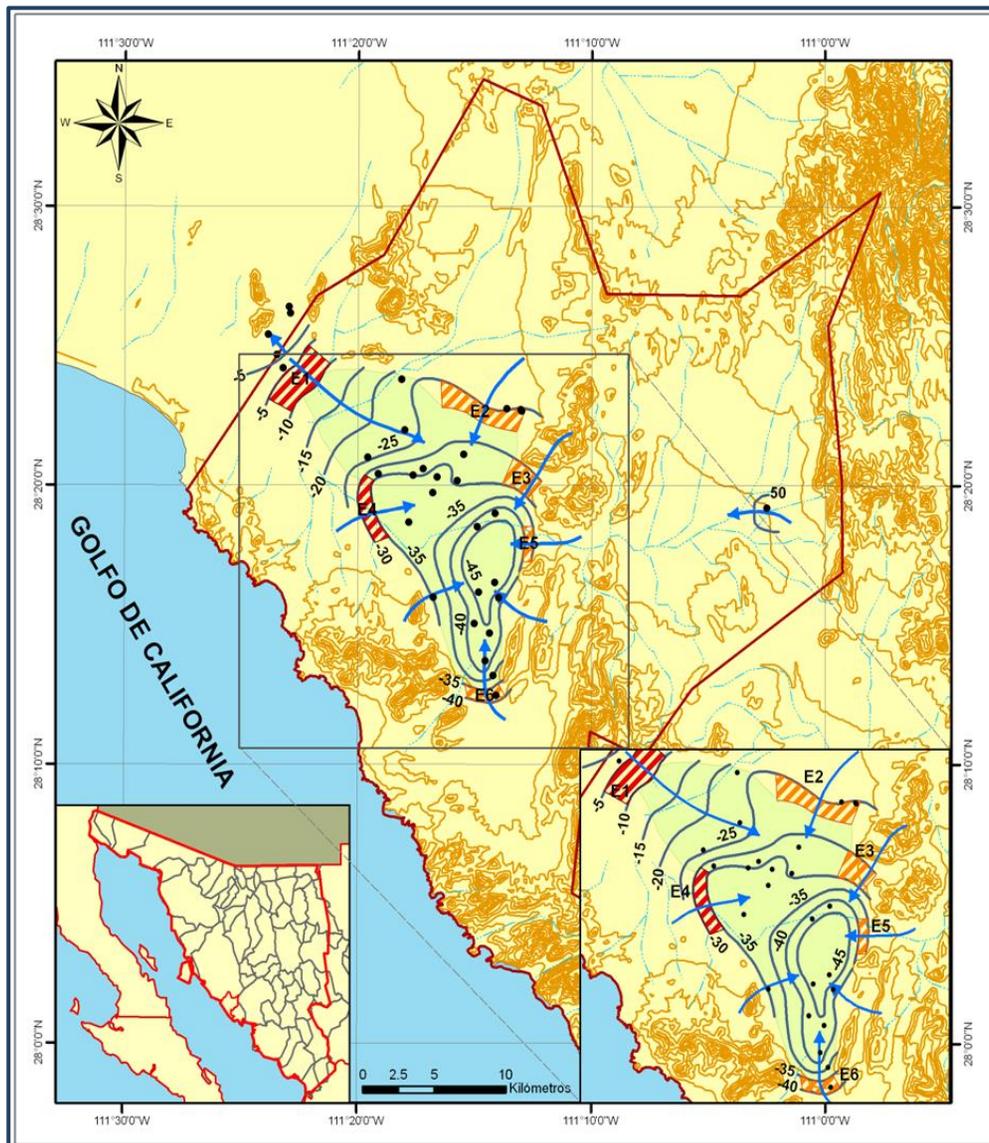


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

5.4.3 Evolución anual del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, existe información dispersa para los años 2005 y 2007, de manera que en total se tienen nueve aprovechamientos con información para estos años ubicados en la parte central del acuífero. Con estos datos se elaboraron las curvas de igual evolución del nivel estático (figura 6), donde se observa que el mayor abatimiento que se presenta en el acuífero es de -3.3 m, y se encuentra en la parte sur.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos, reflejan variaciones puntuales tanto positivas como negativas y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. 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.

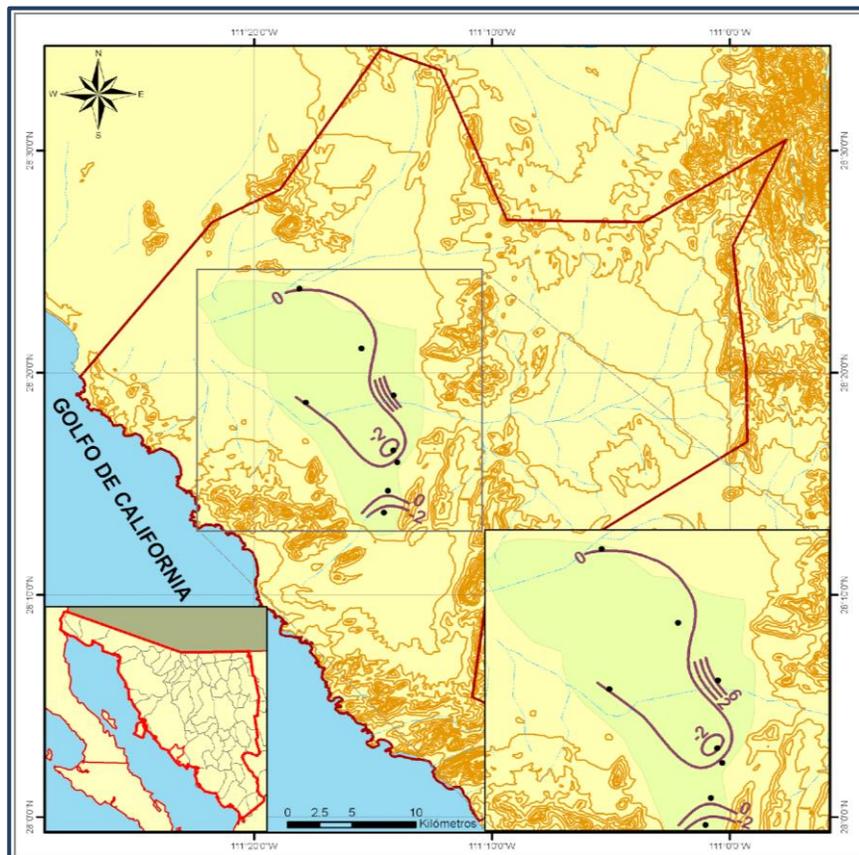


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2005-2009)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2009, se tomaron muestras de agua en 9 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica en la mayoría de los aprovechamientos como agua salobre, agua de mar y salmuera, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995).

Con excepción de tres muestras que se clasifican como agua dulce con valores entre 697 a 1968 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que se localizan al este del acuífero (figura 7).

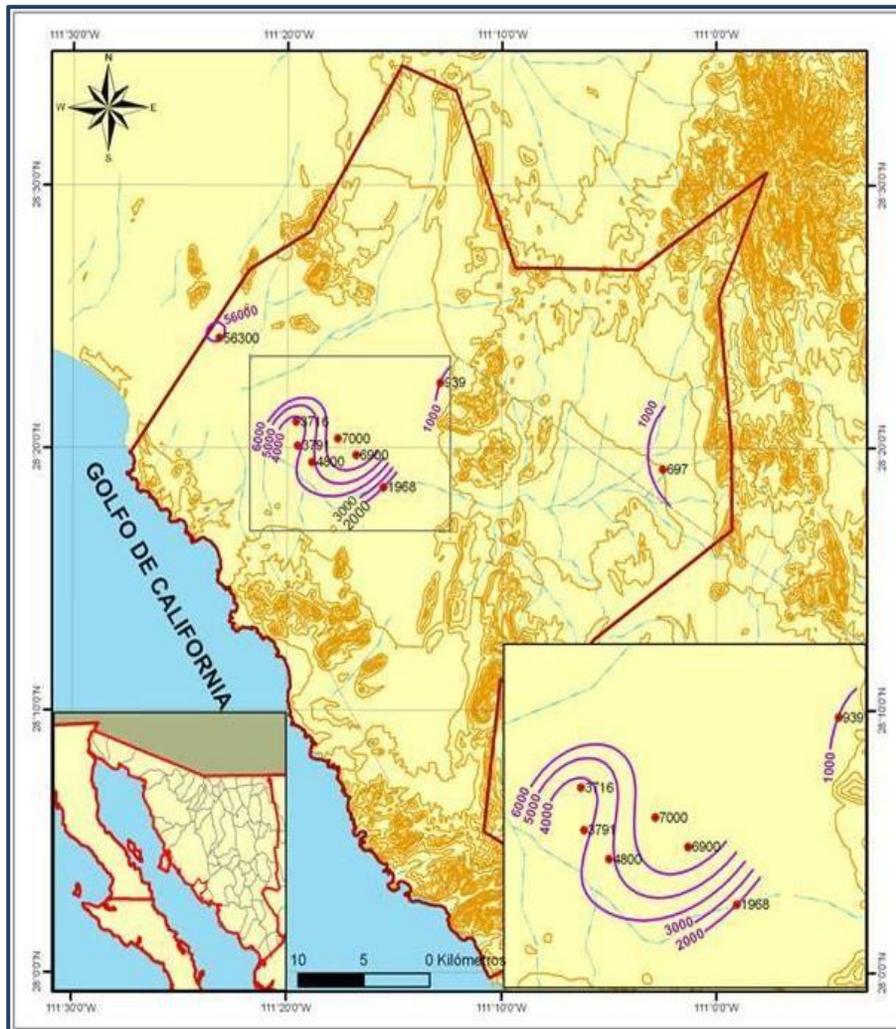


Figura 7. Curvas de isovalores de Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

La representación gráfica de los resultados de los análisis químicos (diagramas de Piper y Stiff) refleja que la familia de agua que predomina es la Clorurada-Sódica que, en el caso del acuífero El Sahuaral, puede ser producto de la mezcla con el agua de mar o que los aprovechamientos se encuentren cortando horizontes evaporíticos.

Solo en un aprovechamiento localizado al este del acuífero se presenta la familia Bicarbonatada Cálctica, que corresponde a agua de reciente infiltración que no ha sufrido intercambio iónico (figura 8).

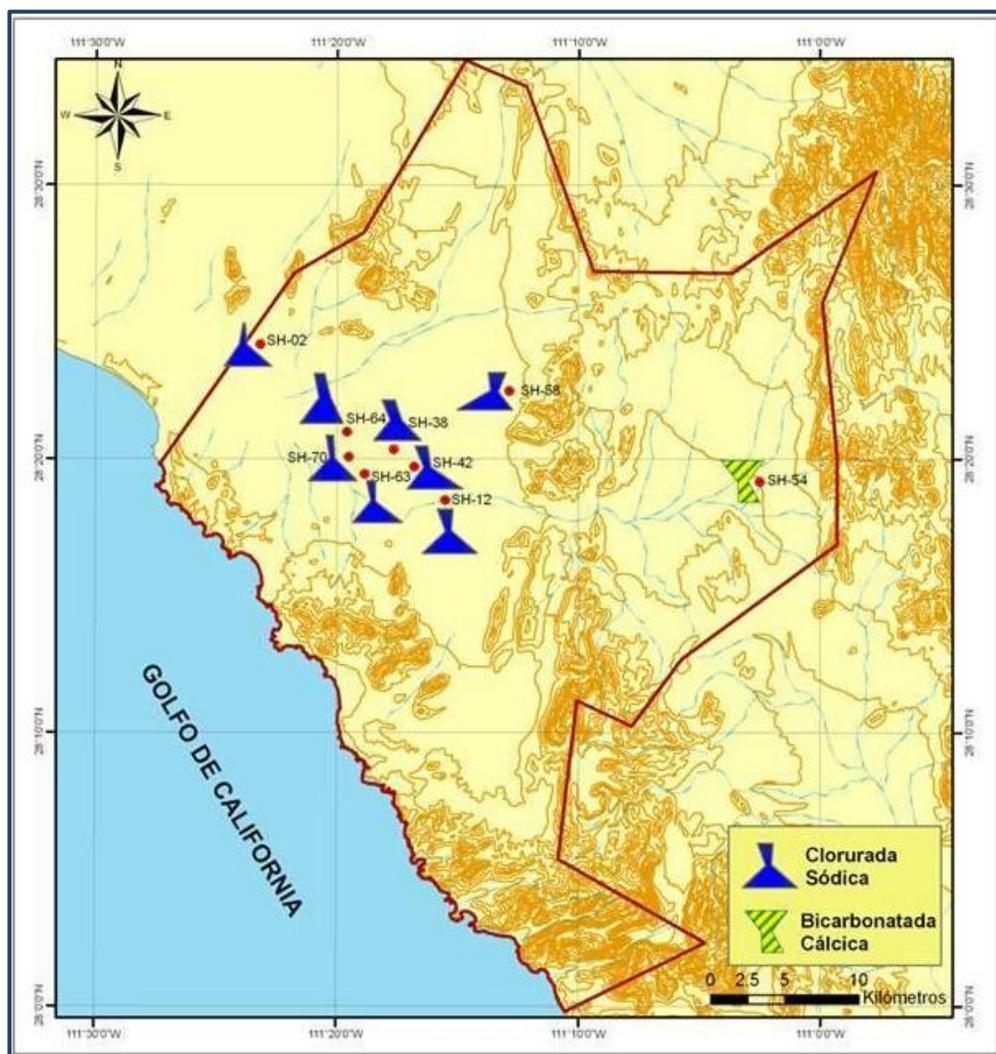


Figura 8. Diagramas de Stiff

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 348 a 28200 mg/l.

En cuanto a los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM), la mayoría de los aprovechamientos presenta concentraciones de Sodio (Na), Cloruros (Cl) y Sólidos Totales Disueltos (STD) por encima del LMP, y algunos para Nitratos (NO_3), Dureza (CaCO_3) y Sulfatos (SO_4).

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2009, existen en el acuífero un total de 97 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 89 se encuentran activos y 8 inactivos.

El volumen de extracción calculado es de **58.6 hm³ anuales**, de los cuales 57.0 hm³ (97.3%) se destinan al uso agrícola, 1.1 hm³ (1.9 %) al uso público-urbano, 0.2 hm³ (0.3 %) para uso doméstico y pecuario, y los 0.3 hm³ restantes (0.5%) para otros usos.

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 definió para el año 2009 en una superficie de 168 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Rr:** Retornos de riego
- B:** Bombeo
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (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 solo se considera la recarga inducida por el riego (R_r).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1).

De esta manera, despejando la recarga vertical se obtiene lo siguiente:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado.

Se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

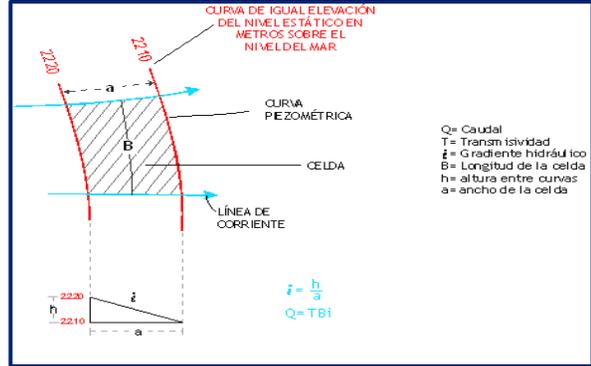
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



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

Cabe destacar que de acuerdo a los resultados de los análisis hidrogeoquímicos, las celdas E1 y E4 corresponden a entradas de agua salada al acuífero.

Los valores de transmisividad (T) utilizados fueron asignados de acuerdo a la posición de la celda con respecto a los resultados de las pruebas de bombeo obtenidos en el estudio de Geocalli Consultores (1978), de modo que se asignaron valores entre 0.0041 y 0.0424 m²/s, como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	4320	2029	5	0.0025	0.0424	0.4514	14.2
E2	5920	1470	2.5	0.0017	0.0041	0.0413	13
E3	2570	1541	5	0.0032	0.0041	0.0342	11
E4	4430	959	5	0.0052	0.0216	0.4989	15.7
E5	1910	670	5	0.0075	0.0041	0.0584	18
E6	2760	808	5	0.0062	0.0204	0.3484	110
TOTAL							45.2

El volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **45.2 hm³ anuales**.

7.1.3 Retornos de riego (Rr)

En el acuífero Sahuaral existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 5,300 has. Según el censo de aprovechamientos subterráneos, los cultivos principales son: trigo (70%), hortaliza (10%) y cítricos (20%). El uso consuntivo promedio (\overline{UC}) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_1^5 A_i UC_i}{\sum_1^5 A_i}$$

Donde A_i y UC_i son el área y el uso consuntivo del cultivo i .

La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney-Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996). Si $i = 1, 2, 3, 4$ para trigo, hortalizas y cítricos, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(1060ha \times 1450mm) + (530ha \times 750mm) + (3710ha \times 1050mm)}{5300 ha} = 1100mm$$

Por el método de balance hídrico, la lámina de recarga por retorno de riego (Rr), se calcula como:

$$Rr = P + L_r - \overline{UC}$$

En donde L_r es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente de la extracción para uso agrícola ($57'015,825 \text{ m}^3/\text{año}$) y la superficie regada (5,300 ha), arrojando un valor de 1075.77 mm. La lámina de precipitación en el acuífero es de 248.9 mm.

De esta manera:

$$Rr = 248.9 + 1075.77 - 1100 = 224.67 \text{ mm}$$

Multiplicada por el área total de riego, la recarga total por riego es de **Rr = 11.9 hm³/año**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente por bombeo (B). No se presenta evapotranspiración (ETR), descarga por flujo base (Dfb), ni salidas horizontales (Sh) en forma de descarga hacia el mar. Por lo que **ETR = 0** y **Sh = 0**.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **58.6 hm³/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 suficiente para elaborar una configuración confiable 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.

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 infiltración vertical (Rv), por lo que, mediante la expresión (2), se tiene:

$$R_v = B - E_h - R_r - \otimes V(S) \quad (2)$$

$$R_v = 58.6 - 45.2 - 11.9 - 0.0$$

$$R_v = 1.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 1.5 + 45.2 + 11.9$$

$$R = 58.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

$$\begin{array}{r} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} \\ \text{SUBSUELO EN UN} \\ \text{ACUÍFERO} \end{array} = \begin{array}{r} \text{RECARGA} \\ \text{TOTAL} \\ \text{MEDIA} \\ \text{ANUAL} \end{array} - \begin{array}{r} \text{DESCARGA} \\ \text{NATURAL} \\ \text{COMPROMETIDA} \end{array} - \begin{array}{r} \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{AGUAS} \\ \text{SUBTERRÁNEAS} \end{array}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **58.6 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, se considera que no existen descargas naturales comprometidas. **DNC = 0.0. hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

Los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **68,072,670 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 58.6 - 0.0 - 68.072670 \\ \text{DMA} &= -9.472670 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **9,472,670 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA