

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN JOSÉ DE GUAYMAS (2636),
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.....	7
3.1.	Provincia fisiográfica.....	7
3.2.	Clima.....	8
3.3.	Hidrografía.....	9
3.4.	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1.	Estratigrafía.....	12
4.2.	Geología estructural.....	17
4.3.	Geología del subsuelo.....	18
5	HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1.	Tipo de acuífero.....	19
5.2.	Parámetros hidráulicos.....	19
5.3.	Piezometría.....	20
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	20
5.4.1.	Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	22
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	23
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	24
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	25
7.1.	Entradas.....	25
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Es).....	26
7.1.3.	Recarga incidental (Ri).....	27
7.2.	Salidas.....	28
7.2.1.	Bombeo (B).....	28
7.2.1.	Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb).....	28
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	28
8.	DISPONIBILIDAD	29
8.1.	Recarga total media anual (R).....	30
8.2.	Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9.	BIBLIOGRAFÍA	32

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 San José de Guaymas, definido con la clave 2636 de la CONAGUA, se localiza en el extremo sur del estado de Sonora, entre los paralelos 27°59'50" y 28°34'34" de latitud norte y 110°57'42" y 111°27'27" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,208 km².

Limita al norte y este con el acuífero Valle de Guaymas; al noroeste y oeste con Sahuaral; ambos del estado de Sonora. Al sur su límite natural es el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente, casi la totalidad del área que comprende el acuífero se localiza en el municipio de Guaymas; sólo una pequeña superficie de su extremo suroriental, pertenece al municipio de Empalme.

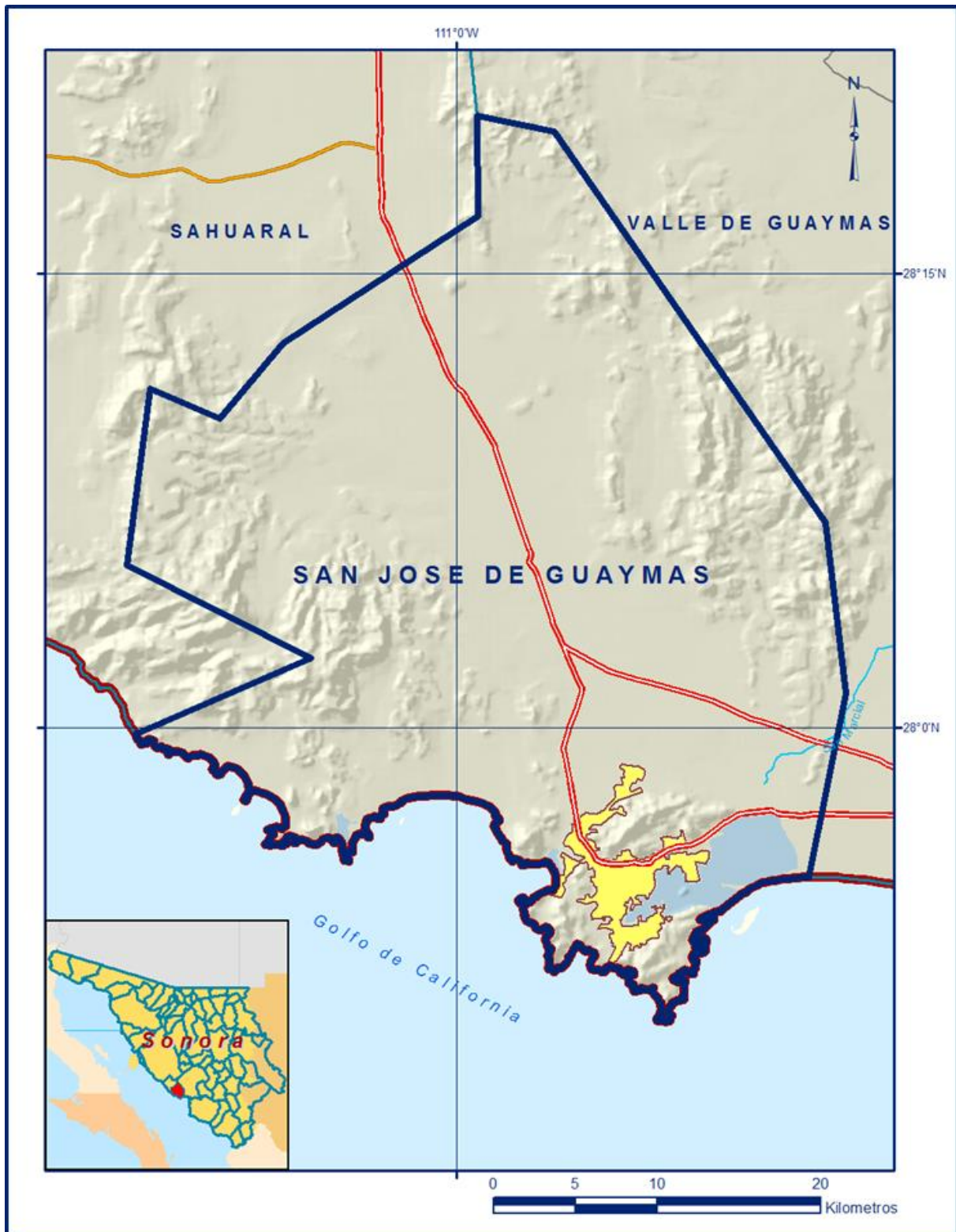


Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca Río Yaqui y Mátape, instalado el 30 de agosto de 2000. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda. En la mayor parte rige el “Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Son.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUIFERO 2636 SAN JOSE DE GUAYMAS

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	48	22.7	27	55	4.9	DEL 1 AL 2 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	111	10	34.5	27	59	48.7	
3	111	4	46.7	28	2	19.6	
4	111	10	51.1	28	5	23.5	
5	111	10	4.9	28	11	11.0	
6	111	7	48.2	28	10	13.9	
7	111	5	43.1	28	12	42.7	
8	110	59	17.5	28	16	53.3	
9	110	59	19.5	28	20	12.5	
10	110	56	46.9	28	19	40.5	
11	110	47	49.9	28	6	47.1	
12	110	47	10.0	28	1	9.3	
1	110	48	22.7	27	55	4.9	

En la porción oriental están en vigor el “Acuerdo por el que se crea el Distrito de Riego del Valle de Guaymas y se declara de utilidad pública la operación de las obras denominadas Valle de Guaymas -Bordo Regulador de Ortiz- y sus canales, y la construcción de obras que se requieran, así como la adquisición de los terrenos necesarios para tales obras”, publicado en el DOF el 5 de julio de 1967; y el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del Valle de Guaymas, Estado de Sonora”, publicado en el DOF el 20 de diciembre de 1956. En una pequeña área de la región suroriental está vigente el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en una zona que comprende el Distrito de Riego del Río Yaqui, con las

delimitaciones que se expresan”, publicado en el DOF el 14 de octubre de 1954. Estas vedas son tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 084 “Guaymas”. Los usuarios se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero San José de Guaymas, A.C., instalado el 10 de agosto de 2007. En la zona costera se localiza el sitio RAMSAR Estero El Soldado, decretado el 02 de febrero de 2011.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

AMPLIACIÓN AL ESTUDIO GEOFÍSICO DEL VALLE DE GUAYMAS, SON., realizado en 1984 por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Su objetivo fue conocer las estructuras geológicas que definen el “acuífero inferior”. Presenta un esquema estructural completamente distinto al considerado anteriormente: el modelo geoestructural es complejo y tiene un control tectónico basado no solo en las estructuras relacionada con el basamento sino también con el paquete sedimentario del relleno, compuesto por depósitos granulares y de un paquete arcilloso, el cual contiene a la llamada “arcilla Azul”, la cual no tiene la continuidad ni geometría propuesta anteriormente, que se suponía era la que separaba la existencia de dos acuíferos, uno superior y otro inferior. Los resultados geofísicos infieren la presencia de un sistema acuífero formado principalmente por la unidad superior y una serie de formaciones acuíferas semiconfinadas y/o “colgadas”. Se confirmó la geometría de una gran fosa cuya presencia tiene gran influencia en el control estructural del comportamiento del frente de intrusión marina y en el cono de abatimiento que se presenta en Maytorena.

AMPLIACIÓN A LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA EL SUMINISTRO DE AGUA EN BLOQUE A LAS CIUDADES DE GUAYMAS, EMPALME Y SAN CARLOS, SONORA. Realizado en 1985 por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Su objetivo fue elaborar modelos

de simulación del flujo y del transporte y difusión de salinidad de los acuíferos cercanos a las poblaciones de Guaymas, Empalme y San Carlos, para predecir los efectos de las distintas alternativas de extracción de aguas subterráneas y elegir la más adecuada para abastecimiento de agua potable a dichas ciudades.

Concluye la expectativa original de disponer de un volumen aprovechable adicional en un acuífero inferior en el Valle de Guaymas quedó frustrada al demostrarse que es de extensión muy limitada, se presenta en bloques semi-aislados en el norte del valle, no es predecible su ubicación y es de baja permeabilidad. No existe un acuífero inferior aprovechable en el Valle de Guaymas, que los acuíferos presentaban intrusión marina y de continuar al ritmo actual se extracción para el año 2010 se predecía que la mitad de la superficie de los acuíferos de San José y la tercera parte de los de Guaymas y Cruz de Piedra tendrían agua salobre no aprovechable.

ESTUDIO DE RESISTIVIDAD POR TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO (TDEM), PARA DEFINIR LA INTERFAZ SALINA, EN EL VALLE DE GUAYMAS, ESTADO DE SONORA. Realizado en el año 2000 por Consultores en Ingeniería Geofísica S.A. de C.V., (CIGSA), para el Tecnológico de Sonora. Su objetivo fue definir las zonas afectadas por la intrusión marina, conocer el comportamiento del subsuelo a profundidades promedio de 300 m y en algunos sitios explorar a profundidad de 1000 m. Identifica la separación a profundidad de los valles de Guaymas y de Boca Abierta que está representado por rocas intrusivas, que afloran localmente en algunas zonas y en otras muestran continuidad en el subsuelo.

ESTUDIOS GEOFÍSICOS E HIDROGEOLÓGICOS PARA IDENTIFICAR SITIOS PERMEABLES PARA EL DISEÑO E INSTALACIÓN DE OBRAS DE INFILTRACIÓN PARA EL ACUÍFERO DEL VALLE DE GUAYMAS. Realizado en 2008 por la Universidad de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua de Sonora. Su objetivo fue realizar los estudios geofísicos e hidrogeológicos necesarios para caracterizar con detalle la permeabilidad, tipo, espesor y posibilidades acuíferas para identificar sitios en los que sea posible la recarga artificial. Evalúa una recarga promedio anual de 100 hm³ e identifica valores de elevación del nivel estático hasta de 40 mbnm en la zona de los poblados Maytorena, Morelos y Santa María. Propone los sitios Bordo de Ortíz y Maytorena para la construcción de embalses para la recarga artificial.

ESTUDIO DE IMPACTO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL AVANCE DE LA INTERFASE MARINA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS VALLE DEL YAQUI, COCORAQUE, VALLE DE GUAYMAS Y SAN JOSÉ DE GUAYMAS. Realizado en 2011 por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo

general fue actualizar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos para desarrollar un modelo de simulación de los sistemas, con el propósito de definir los impactos en las condiciones del acuífero ante diversos escenarios de cambio climático.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO SAN JOSÉ DE GUAYMAS, SONORA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre la totalidad del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica “Sierras y Llanuras Sonorenses”. Según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Desierto o Llanura Sonorense, Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

La Provincia Llanura Sonorense se extiende de sur a norte desde Arizona, EUA hasta el sur del estado de Sonora, abarcando gran parte de las regiones costeras. Gran parte de su extensión consta de sierras bajas paralelas de bloques fallados, orientadas burdamente nornoroeste-sursureste, y separadas unas de otras por llanuras cada vez más amplias y bajas hacia el Golfo de California. Presenta amplias superficies planas con suave pendiente hacia el mar, frente a las que destacan cerros profundamente erosionados, colinas y sierras bajas, rodeados de conos aluviales muy tendidos

La Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses es una de las dos que integran la provincia, está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Las sierras son más elevadas varían de 700 a 1 400 msnm y son más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan las rocas intrusivas ácidas y en menor proporción, en la región central, rocas volcánicas, metamórficas y calizas. Las llanuras representan alrededor de 80% de la subprovincia; están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes.

3.2. Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para México por E. García (1981), se determina que el clima que predomina en la mayor parte de la superficie que cubre

el acuífero es BW(h')w muy árido y cálido, y BSo(h')(x') árido cálido, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

En la porción occidental el clima es BW(h')(x') y BWh(x') muy árido, cálido y semicálido, respectivamente, con temperatura media anual entre 18 y 22 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C y temperatura del mes más cálido mayor de 22 °C. Las lluvias se presentan repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de junio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. La temperatura media anual presenta valores extremos de 3 °C como mínima y 40 °C como máxima; la temporada de lluvias tiene lugar entre los meses de junio a octubre, destacando el mes de agosto como el más lluvioso.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 3 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Guaymas, Francisco Márquez y Empalme (Observatorio); cuyo registro comprende el periodo 1982-2015. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son **19.9 °C, 342 mm y 2082 mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica No. 9 “Sonora Sur”, Subregión Hidrológica Río Yaqui, cuenca del Río Mátape, subcuenca San José de Guaymas. La cuenca del Río Mátape se localiza en la porción central del estado de Sonora, íntegramente dentro de él, y al oeste de la Región Hidrológica No. 9, comprende un área de 9,030 km² en su totalidad y drena un área de 7,212 km² excluyendo las subcuencas (D) Guaymas y (F) Arroyo Tetabiate. Presenta una precipitación media anual de 398.7 mm y una pendiente general que oscila de media a baja.

La corriente superficial más importante en la zona y el dren principal es el Río Mátape, el cual se origina en la Sierra de Mazatán a 1,500 msnm, al noreste de Villa Pesqueira (Mátape), en la denominada Subcuenca (B1) Río Mátape, desde donde inicia su

trayectoria hasta descargar sus aguas en el vaso de la Presa Ignacio L. Alatorre, para posteriormente, cambiar el nombre de su cauce al de Río San Marcial, cuyas aguas son finalmente utilizadas en la zona agrícola del Valle de Guaymas. Es de tipo intermitente y tiene como tributarios importantes los arroyos El Echo y El Seco, que confluyen a él por la margen derecha, cerca de la población de Ortiz, Sonora. Durante este recorrido, su dirección general noreste–suroeste, teniendo como afluentes una gran cantidad de arroyos de carácter intermitente. El Río Mátape tiene una longitud total aproximada desde su origen hasta su desembocadura de 197 km; tiene un escurrimiento medio anual estimado en 61.56 Mm³, un rumbo general hacia el sur, hasta desembocar en el Golfo de California, al oriente de la bahía y puerto de Guaymas.

El cauce principal es el arroyo San José, que escurre con dirección norte-sur, y desemboca en el estero El Rancho, en el Golfo de California. Sus afluentes principales son los arroyos La Tinaja, Nochebuena, El Tigre, La Mula, El Guajare y San Vicente que sólo conducen agua en época de lluvia.

La red de drenaje principal es el tipo dendrítico, que se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos generalmente menores a noventa grados

3.4. Geomorfología

De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo, 1990), la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Planicie Acumulativa Marginal, Aluvial Eólica y de Piamonte, perteneciente a la Provincia de Sonora; en la cuenca baja del Río Mátape.

La cuenca del Río Mátape tiene su límite natural al norte en la estribación oeste de la Sierra Madre Occidental. El acuífero está limitado al oeste por la Sierra Libre y sus prolongaciones meridionales representadas por las Sierras Santa Úrsula y La Ventana; al este el límite de la cuenca lo forman las sierras El Bacatete, Moradillas y Cordillera del Carrizal. La primera de ellas está formada por rocas ígneas extrusivas terciarias, la segunda por rocas intrusivas y la última por extrusivas cretácicas. Las mayores elevaciones corresponden a las sierras constituidas por rocas ígneas, que alcanzan altitudes de hasta 1,000 msnm. Se identifican unidades de lomeríos, laderas montañosas, piedemontes, planicie aluvial y planicie costera

La morfología de la zona está definida por tres rasgos sobresalientes: el primero consiste de una gran llanura aluvial, orientada en dirección norte-sur, en la cual se aloja el Valle de Guaymas. El segundo rasgo está expuesto por otra llanura de reducidas

dimensiones, orientada en dirección NW-SE, que forma el Valle de San José de Guaymas. La elevación máxima de ambas llanuras es de 100 msnm y están constituidas por depósitos clásticos recientes. Por último, las sierras altas que conforman los límites norte, este y oeste de la cuenca y las de menor elevación en el extremo Sur. La costa está representada por playas bajas, en las que se han formado esteros, cabos y bahías como las de Guaymas, San Francisco y Bocochibampo.

Geomorfológicamente el área presenta elementos litológicos y estructurales que la ubican dentro del ciclo erosivo de montañas plegadas, en una etapa de madurez tardía. Como evidencia de esta etapa se observan algunos bloques de calizas del Paleozoico, plegadas y metamorfoseadas, que forman escarpes abruptos.

Las tobas y andesitas de la Formación Tarahumara presentan topografía suave, forman barrancos poco profundos y algunos cerros de poca altura. Las rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno (Formación Lista Blanca) forman cordones y mesetas alargadas con pendientes menos escarpadas, la cual al sur incrementa su espesor y extensión. Las rocas intrusivas del Batolito Sonora presentan formas con pendientes suaves y poca elevación debido al alto grado de alteración e intemperismo al que han estado expuestas. Los valles están constituidos por conglomerados, arenas, gravas y arcillas de edad Mioceno-Holoceno, que forman pequeños lomeríos y cerros con pendientes suaves, al poniente del área las elevaciones oscilan entre 100 y 150 msnm.

4. GEOLOGÍA

Las rocas más antiguas se localizan en la porción noreste y están representadas por una secuencia detrítico-carbonatada que fue depositada en un ambiente de plataforma somera (Rangin 1978), conformada por calizas y areniscas, con o sin la presencia de lutitas y pedernal. Las edades de estas rocas varían del Cámbrico al Pérmico y se consideran discordantes sobre las rocas proterozoicas que afloran en el acuífero Costa de Hermosillo y en las inmediaciones de la ciudad de Hermosillo. Aunque esta relación es dudosa, puede existir una continuidad sedimentaria entre las rocas del Proterozoico Tardío y las del Paleozoico. Sus afloramientos se ubican en la Sierra Santa Teresa y en la región de Cobachi, los cuales se encuentran sobreyacidos discordantemente por rocas mesozoicas.

EL Mesozoico está representado por potentes secuencias de areniscas-calizas y areniscas-lutitas con algunos conglomerados pertenecientes al Grupo Barranca, la edad para esta secuencia es Triásico tardío por estudios de flora y fauna fósil de edad Cárnica (Alencaster, 1961); en la secuencia lutítica aparecen intercalados mantos de

carbón, los cuales en algunas localidades presentan diversos grados de metamorfismo térmico dando origen a grafito amorfo, estas rocas afloran principalmente en la región de San Marcial hacia la porción centro-oriental de la carta Sierra libre. En la costa de Empalme-Guaymas a 12 km al noreste de San Carlos, afloran rocas compuestas por hornfels calcoasilicatados de posible edad mesozoica (Johnpeer, 1977). Las rocas anteriormente descritas se encuentran intrusionadas por rocas del Batolito granítico de Sonora de edad Cretácico tardío Eoceno, (Damon et al, 1983 y Valencia et al, 2001); dichas rocas intrusivas laramídicas están ampliamente distribuidos en toda la costa de Sonora y Sinaloa y están compuestas a su vez, por granitos y granodioritas presentes como pequeños afloramientos cubiertos parcialmente por rocas volcánicas miocénicas (Wilson, 1978) o clásticas y aluviones cuaternarios. En el área estas rocas afloran en la sierra Santa Úrsula y la Sierra El Bacatete. Discordantemente sobre las rocas triásicas afloran rocas del Cretácico Superior, constituidas por derrames volcánicos andesíticos y tobas andesíticas interestratificadas con algunos sedimentos, que son correlacionables con la parte inferior de la Formación Tarahumara, así como también rocas volcánicas de edad miocénicas principalmente félsicas (Gastil y Krummenacher, 1977) con edades de 24 y 11 Ma. (Mora-Álvarez y McDowell 2000). Las rocas volcánicas más jóvenes consisten en basaltos toleíticos y calcialcalinos (Roldan et al, 2004), que cubren las secuencias anteriormente descritas y afloran en la Sierras Santa Úrsula y del Bacatete, así como en el graben de Empalme

Las rocas intrusivas cubren gran parte de la zona central del acuífero, su composición varía de granito a granodiorita con una edad del Triásico al Paleoceno. La Formación Báucarit tiene una amplia distribución en el sureste y está conformada por un conglomerado polimíctico constituido por rocas volcánicas e intrusivas con intercalaciones de arenisca y basalto.

Las rocas volcánicas están constituidas por una secuencia intercalada de tobas riolíticas, ignimbritas, dacitas, riolitas y aglomerados de depósitos vulcanosedimentarios, cuya edad se asignó al Mioceno Superior. Las rocas del Pleistoceno están representadas por un conglomerado polimíctico que se aloja en los valles y piedemonte; es poco consolidado y está constituido por riolitas, andesitas e ignimbritas, embebidos en una matriz arenosa.

El aluvión del Holoceno está conformado por gravas, arenas, limos y arcillas, de espesor variable que alcanza hasta los 50 m; se encuentra en las zonas topográficamente bajas, cubriendo a las unidades más antiguas

4.1. Estratigrafía

A nivel regional afloran rocas ígneas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, cuyas edades varían del Paleozoico al Reciente. La columna estratigráfica está representada por secuencias detrítico-carbonatadas, andesíticas, riolíticas, tobáceas, dacíticas y riodacíticas, así como de sedimentos continentales con presencia de esporádicos derrames volcánicos, constituidos por basaltos de olivino y andesitas basálticas, así como también conglomerados, arcillas, limos, arenas y gravas (figura 2).

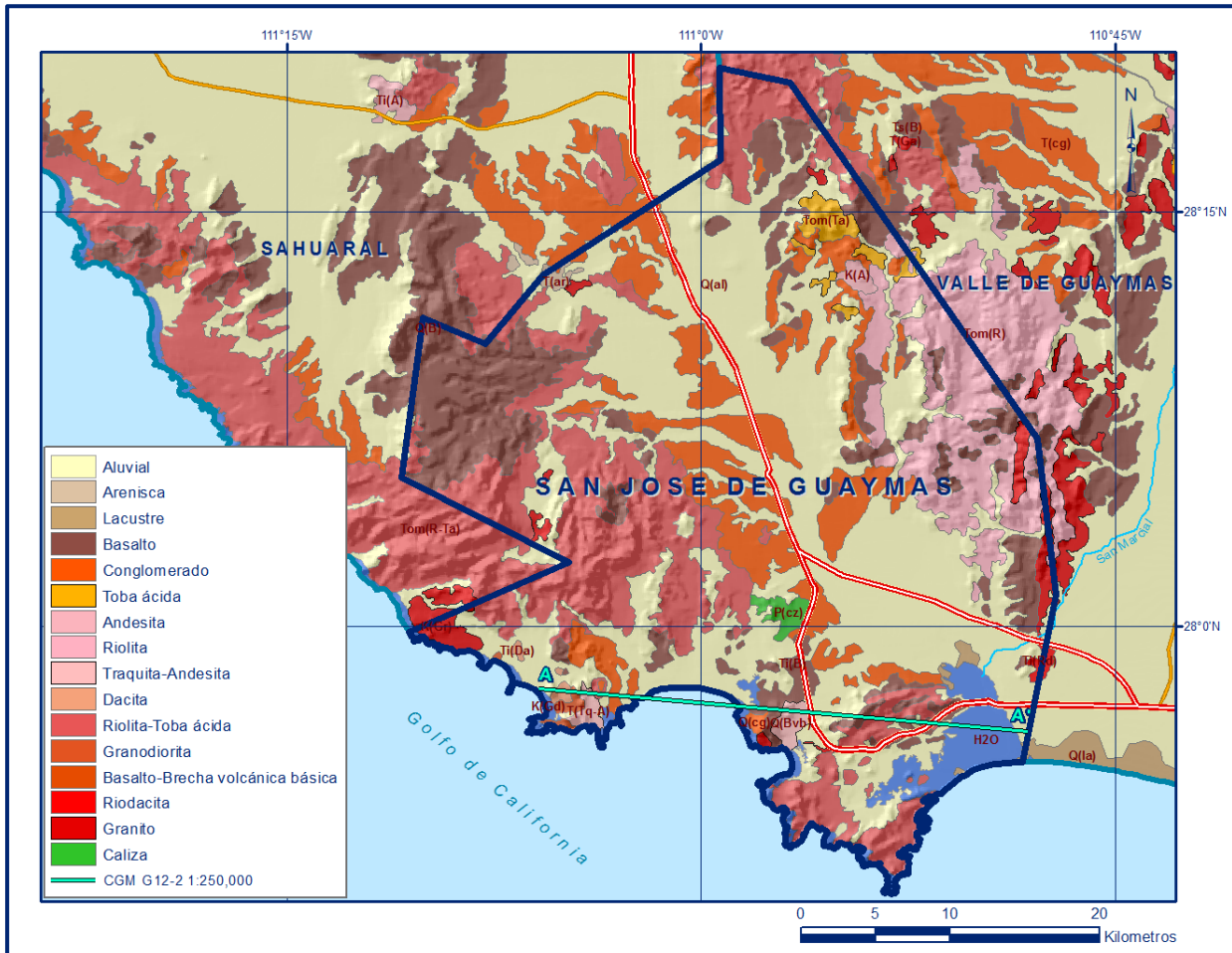


Figura 2. Geología general del acuífero

La descripción de las unidades litológicas expuestas en la superficie del acuífero fue realizada por el Servicio Geológico Mexicano en sus cartas Geológico Mineras “Guaymas” y “Sierra Libre”, escala 1:250,000. A continuación, se hace una breve descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente:

PALEOZOICO

La unidad más antigua corresponde a un metacaliza de edad Devónico-Pérmico, que presenta zonas de metamorfismo de contacto con presencia de hornfels y mármol,

debido a la intrusión de cuerpos ígneos graníticos y granodioríticos. Una de sus características principales es la presencia de pedernal y en algunas localidades está afectada por diques aplíticos. Sus afloramientos se localizan al norte del acuífero, de manera local y aislada se presenta al noroeste de la ciudad de Guaymas; están compuestos por intercalaciones de calizas de estratificación media a gruesa y areniscas mal clasificadas. Otros afloramientos de rocas similares fueron estudiados por Valentine (1936; fuera de este acuífero) donde encontró fragmentos fósiles del Paleozoico Superior, sin embargo, se le atribuye una edad dominante del Ordovícico. El intervalo Devónico-Permiano consiste de secuencias estratificadas depositadas en un ambiente marino muy somero y de plataforma continental, constituidas de caliza, arenisca, caliza arcillosa, conglomerado, lodolita y dolomía. Esta secuencia se presenta en capas de espesor delgado a mediano y contienen abundante fauna de estromatopóridos (*Amphiporasp.* y *Actinostromasp.*), briozoarios, corales y braquiópodos silicificados del Devónico Superior. El ambiente de depósito determinado por esta fauna fósil, permite definir que es de plataforma somera y plataforma arrecifal.

MESOZOICO CRETÁCICO

Está representado por cuerpos intrusivos de composición granítica de posible edad Cretácico inferior. Intrusionan a las calizas y areniscas del Paleozoico y están cubiertas por unidades del Terciario. Su rasgo estructural característico es la segmentación que divide los afloramientos alargados y orientados en dirección noroeste-sureste, producto de la tectónica terciaria.

Discordantemente sobre las rocas paleozoicas afloran rocas volcánicas de composición intermedia, correlacionables con la Formación Tarahumara, descrita formalmente por Wilson y Rocha (1946) al referirse a una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica, así como rocas vulcanosedimentarias. Su color varía de gris a pardo, con tonalidades rojizas al intemperismo; de textura afanítica y porfídica. Hidrogeológicamente se le considera de permeabilidad baja.

Durante el cambio del Cretácico al Terciario esta región fue el escenario de una intensa actividad magmática, actualmente representada por una serie de rocas ígneas de afinidad granítica (granitos, dioritas y granitos-granodioritas), cuyas edades varían del Cretácico Tardío al Eoceno. Sin embargo, desde el punto de vista petrogenético, se trata de una serie calcoalcalina emplazada en un ambiente de arco continental en el período tectónico llamado "Orogenia Laramide" (Damon et al., 1964). Para el área de Hermosillo, Rodríguez-Castañeda (1981) cita a varios autores que han determinado

edades de 64 Ma, la cual es aproximadamente la base del Paleoceno (Harland et al., 1989). Contemporáneas a las rocas intrusivas, fueron emplazadas rocas volcánicas del Cretácico Superior, representadas por andesitas y tobas andesíticas que presentan diferentes grados de alteración propilítica y un grado de fracturamiento que varía de intenso a moderado. Se observa únicamente un pequeño afloramiento al norte de San Carlos, Nuevo Guaymas, sin embargo, es posible que a profundidad representen masas de mayor importancia. Estas rocas se pueden correlacionar con la formación Tarahumara definida por Wilson y Rocha.

Batolito Laramide

Intrusivos Porfídicos Secundarios

El Batolito Laramide de Sonora, definido por Damon (1983), tiene una amplia distribución en la zona, aflora en las porciones norte y oriental del acuífero, extendiéndose de forma alargada con una orientación preferente norte-sur. Incluye intrusiones de cuerpos que se observan en toda esta porción sur del estado de Sonora, aunque su litología varía un poco, fueron englobadas por el Consejo de Recursos Minerales (COREMI 1998). De manera general, es compacto con textura porfídica, de color gris claro a crema y en superficie al estar intemperizado presenta una coloración ocre. Representa en el acuífero una barrera impermeable y es parte del basamento hidrogeológico.

Toba Riolítica-Dacita

Roca volcánica y piroclástica de composición ácida con dacitas en la cima, que aflora en las porciones oriental y occidental del acuífero, en las sierras que lo delimitan. Sus afloramientos se extienden fuera de la poligonal que circunscribe al acuífero, incluye afloramientos de derrames y aglomerados volcánicos de composición andesítica-dacítica.

TERCIARIO

Las unidades volcánicas emplazadas durante el Mioceno representan las unidades de mayor distribución espacial regional y dentro del acuífero. Existen también algunas unidades sedimentarias conglomeráticas antiguas que se asocian con el emplazamiento de esta secuencia volcánica, por lo que su distinción es relevante en el contexto geológico. Existen, sin embargo, rocas de distintas edades que representan distintos ambientes de formación. Las rocas más antiguas son del Oligoceno y se asocian a las últimas etapas de la subducción. Generalmente se relacionan con la formación de la Sierra Madre Occidental, ya que se componen de riolitas y tobas riolíticas, y en menor proporción de andesitas. Poseen grados de alteración propilítica variable y por lo general se encuentran muy fracturadas.

Dentro del área también ocurre una secuencia que se compone principalmente de riolitas y tobas riolíticas, pero esta secuencia es del Terciario Medio (Mioceno) y posee además abundantes proporciones de dacitas y basaltos. La Sierra Santa Úrsula representa el mejor sitio de referencia de esta secuencia, sin embargo, las unidades basálticas se encuentran en los márgenes de estas unidades o en la cima de la secuencia, representando un evento final o terminal de este volcanismo del Mioceno.

Andesita-Dacita

Unidad volcánica del Oligoceno de composición intermedia-ácida, constituida por andesitas y dacitas de textura porfídica así como por rocas piroclásticas que presentan una coloración que varía de gris claro a rojizo. Sus afloramientos se ubican principalmente hacia el sur, en la Sierra La Ventana y al sur del Rancho La Escondida, localizado fuera del área del acuífero. Hidrogeológicamente esta unidad presenta permeabilidad media a baja debido a su escaso fracturamiento

Formación Báucarit

Definida por King en 1939 como una secuencia de areniscas, arcillas y conglomerados bien estratificados, ligeramente consolidados, que en su parte basal presenta derrames de basalto intercalados con aglomerados basálticos. El Consejo de Recursos Minerales agrupó dentro de esta formación a una secuencia de rocas volcánicas intermedias y básicas que están intercaladas con los conglomerados. También agrupa a un conglomerado polimíctico con clastos de basalto y andesitas basálticas. Dado su alto grado de compactación, se considera el basamento hidrogeológico de la unidad granular del acuífero y frecuentemente crea condiciones de semiconfinamiento. Sin embargo, cuando dominan los depósitos sedimentarios y los conglomerados presentan fracturamiento, presenta permeabilidad media.

Formación Lista Blanca

Definida por Dumble (1900), consiste de una secuencia volcánica y conglomerática a la que se le ha asignado una edad correspondiente al Terciario (Bertolini et al. 1991), ya que sobreyace de manera concordante al conglomerado de la Formación Báucarit. El material volcánico de esta formación y los flujos de andesitas-dacitas traquitas, tobas riolíticas y riolitas, algunos de ellos coronados por basaltos del Mioceno tardío, afloran en 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 de posible edad miocénica, constituidos por rocas micrograníticas subvolcánicas que edifican esta sierra.

Toba Riolítica-Basalto

Nombre con el que se conoce a la secuencia de rocas volcánicas y vulcanoclásticas de textura afanítica, de composición basáltica y andesítica-basáltica, intercaladas con tobas riolíticas e ignimbritas, que afloran en los extremos suroriental y suroccidental del acuífero. La andesita basáltica está intercalada con tobas riolíticas e ignimbritas y sobreyace a la Formación Lista Blanca. Se considera de permeabilidad media y en superficie conforma zonas de recarga.

A nivel regional las lavas basálticas representan la última manifestación volcánica del Terciario. La edad de estas erupciones, de acuerdo a la posición estratigráfica que guardan con respecto a los depósitos marinos del Mioceno que le sobreyacen, puede situarse en el Oligoceno. En el acuífero se presentan basaltos y brechas basálticas posteriores a las unidades volcánicas dacíticas-riolíticas, a las cuales cubren en discordancia. En algunas zonas dentro de los límites del acuífero es claro que estos basaltos tienen un modo de emplazamiento controlado por estructuras, como puede ser visto al sureste del cerro La Panocha y en el Graben de Empalme

El Plioceno está representado por areniscas y conglomerados polimícticos, con horizontes de limolitas y coquinas, conocidas como Formación Infierno del Plioceno Superior.

CUATERNARIO

Conglomerados Recientes Limos, Arenas y Gravas

Los conglomerados recientes son de tipo polimíctico mal consolidados, con escasos horizontes de limos y arenas; los clastos de los conglomerados están por lo general bien redondeados. Forman terrazas, depósitos de talud y pequeños abanicos aluviales, que constituyen el acuífero en explotación. Debido a su litología se considera que presentan permeabilidad media a alta.

Aluvión

Son los sedimentos del Holoceno producto del intemperismo de las rocas pre-existentes y que fueron depositados como abanicos aluviales y fluviales. Se presentan a lo largo de ríos, arroyos y planicies de inundación; están constituidos por gravas de diferentes litologías, arenas y limos. Aunque tienen permeabilidad alta, su espesor es reducido. Junto con los conglomerados conforman el acuífero que actualmente se explota. Las planicies aluviales están constituidas por este tipo de depósitos; en ellas se han desarrollado terrazas aluviales ocasionadas por eventuales rejuvenecimientos. Estas secuencias descansan en mayor proporción sobre rocas terciarias.

Los depósitos lacustres y palustres se acumularon en la zona costera, producto de la conexión mar–continente o en pequeñas cuencas endorreicas. Por último, los depósitos eólicos son producto de la actividad de los vientos sobre los sedimentos de playa.

4.2. Geología estructural

La característica geomorfológica más importante es una sucesión de sierras alargadas afectadas por grandes fallas de rumbo preferencial NW-SE truncadas por fallas de orientación NE-SE; esta orientación es típica en la región y es atribuida al último régimen distensivo del Terciario que dislocó las unidades preterciarias, borrando gran parte de los eventos tectónicos anteriores. Aún se puede reconocer la deformación laramídica en la intrusión del batolito Cretácico-Terciario, representado por los granitos y granodioritas; las fallas más importantes son normales de rumbo NW-SE y se encuentran en la porción noreste, en los flancos oriental y occidental de la Sierra El Bacatete, con longitudes que en ocasiones rebasan los 10 km y desplazamiento vertical que sobrepasa los 500 m. Existen otras fallas burdamente paralelas, de menor longitud y desplazamiento, que forman pequeñas fosas y pilares muy localizados en la misma sierra. En el Cerro El Vigía, al norte de Guaymas muy cerca de la torre de microondas, se localizaron pequeñas fallas normales de orientación NE-SW, casi verticales que cortan y dislocan a toda la secuencia volcánica incluyendo a los basaltos; estas fallas y curvilineamientos se cree que formaron parte de la caldera de Guaymas sugerida por Johnpeer (1977), quien relaciona el período volcánico básico como una etapa inmediatamente anterior a la apertura del Golfo de California ocurrida hace 4 Ma. Eventos intrusivos posteriores generaron apófisis y troncos de diferente composición durante la fase final de la subducción de las placas Farallón y Norteamérica; este evento es seguido en el Mioceno por un periodo de extensión tectónica, que ocasionó la formación de innumerables fallas normales regionales, conformando bloques levantados y escalonados que dieron origen a la morfología de sierras y valles alargados principalmente de rumbo NW-SE y N-S. Durante esta fase extensiva se desarrolla un adelgazamiento de la corteza con fusión parcial, generando magma basáltico que a través de vulcanismo fisural alcanza la superficie a través de fallas normales activas y fracturas (Carta Geológico Minera “Guaymas”, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano, 2002).

En el Plioceno tiene lugar la apertura del Golfo de California, este sistema es la manifestación del movimiento relativo entre la Placa Norteamericana y la Placa del Pacífico, la cual dio origen a otro periodo de fallamiento que al conjugarse con las anteriores fallas dio al basamento del Valle de Guaymas la característica de formar pequeñas cuencas, que posiblemente estén ligadas a las emisiones basálticas

alcalinas del Pliocuatnario que se han identificado en las Sierras de Santa Úrsula y La Pasión.

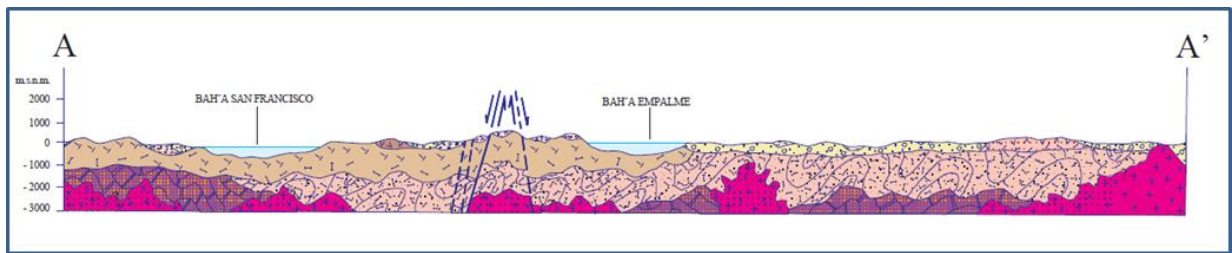
Los estudios geofísicos confirman que el subsuelo del valle está conformado por una serie de fosas y pilares tectónicos con orientación tanto N-S como E-W. Por la magnitud del desplazamiento y longitud de sus elementos, el sistema de fallamiento más importante es el N-S que forma un graben en el Valle de Guaymas. Está constituido por varios bloques, cuyo límite más importante corresponde a la Sierra de San Francisquito formada por rocas graníticas. El sistema de fallas orientadas E-W, de menor importancia que el anterior, que al conjugarse forman en el subsuelo varias pequeñas cuencas.

Los planos de pseudoestratificación de los derrames basálticos en la Sierra El Bacatete están inclinados hacia el valle; en tanto que, en la porción occidental, en las Sierras de Santa Úrsula y La Pasión, buzan hacia el Valle de San José de Guaymas.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información hidrogeológica y de la geología superficial y del subsuelo recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado en un sistema de fosas tectónicas constituidas por dos unidades que presentan conexión hidráulica entre ellas; la unidad superior está conformada por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, cuyo espesor varía de 200 a 400 m. Dentro de esta unidad, existe un estrato arcilloso, cuya continuidad puede seguirse lateralmente algunas centenas de metros, antes de ser interrumpida por cambios de facies. La unidad inferior presenta condiciones de semiconfinamiento y se aloja en los sedimentos clásticos de la Formación Báucarit, compuesta por fragmentos de rocas volcánicas, arenas gruesas, limos, así como algunos derrames volcánicos de composición basáltica y riolítica. Entre estas dos unidades existen horizontes, capas y lentes de arcillas de color gris-azul que contiene fósiles marinos, conocida regionalmente como “arcilla azul”, cuyo espesor promedio varía de 50 a 180 m.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico, están representados por las mismas rocas volcánicas al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y por rocas ígneas intrusivas y metasedimentarias (figura 3).



FUENTE: Carta Geológico-Minera G12-2 "Guaymas" Escala 1:250.000 (SGM, 2002).

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, así como los cortes litológicos de pozos permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la alternancia e interdigitación con lentes de sedimentos arcillosos; alojado en un sistema de fosas tectónicas. Está constituido por dos unidades que presentan conexión hidráulica entre ellas; la unidad superior está constituida por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada depositados por el río Mátape y arroyo San José de Guaymas, así como depósitos eólicos, de playa y de barra, hacia la zona costera; todos ellos de granulometría variada (gravas y arenas intercaladas con materiales finos), que en general tienen alta permeabilidad, recargan a las unidades más profundas y tienen un espesor conjunto que varía de 200 a 400 m y es la que actualmente se explota ya que sustenta el abastecimiento agrícola del Distrito de Riego 084 "Guaymas" y para dotación de agua potable a las ciudades de Empalme y Guaymas.

La unidad inferior presenta condiciones de semiconfinamiento y está conformada por sedimentos clásticos de la Formación Báucarit, compuesta por fragmentos de rocas volcánicas (andesitas, riolitas y granitos), así como arenas gruesas y limos, dispuestos en capas delgadas que presentan estructura laminar. Estos depósitos se encuentran alternando con derrames volcánicos de composición basáltica y riolítica. Entre estas dos unidades existen horizontes, capas y lentes de arcillas de color gris-azul que contiene fósiles marinos, conocida regionalmente como "arcilla azul", cuyo espesor promedio varía de 50 a 180 m, cuya continuidad puede seguirse lateralmente algunas centenas de metros, antes de ser interrumpida por cambios de facies.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la estimación de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas que conforman el acuífero, se analizó la información de pruebas de bombeo, la mayoría de ellas de corta duración, que se han realizado como parte de estudios previos a lo largo

de varias décadas (SARH, CONAGUA, UNISON, ITSON). De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los valores de transmisividad varían de **8.5×10^{-5} a $80.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio entre **1.0 y $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , dependiendo de la granulometría de los depósitos aluviales y fluviales. En términos generales, los valores decrecen de norte a sur, en la dirección de escurrimiento de los ríos y arroyos; y de la porción occidental del valle hacia la porción oriental; los valores mayores de transmisividad se presentan en las fosas identificadas mediante estudios geofísicos, donde existe mayor espesor de los depósitos aluviales, y las menores en las proximidades del litoral.

Los caudales específicos varían entre 9 y 100 lps/m, con una distribución en el área muy semejante a la de la transmisividad. Debido a que los basaltos presentan fracturamiento, los pozos perforados en ellos aportan caudales mayores a 100 lps.

Los valores de conductividad hidráulica varían de **6.4 a 1382 m/d (7.4×10^{-5} a $1.6 \times 10^{-2} \text{ m/s}$)**; en tanto que los valores reportados para el coeficiente de almacenamiento oscilan entre **1.3×10^{-3} y 1.5×10^{-4}** , para los sedimentos de granulometría fina, y de **0.12 a 0.15** para los depósitos de mayor granulometría.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2011 además de registros históricos durante el periodo 1995-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Noroeste, durante los paros de bombeo que realiza exprofeso para ello. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 5 a 40 m en la principal zona de explotación, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera del Golfo de California y del cauce de arroyo San José y otros, hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle. Los niveles estáticos más someros, menores de 10 m, se registran en la porción baja de la cuenca, entre la bahía de Guaymas y San José de Guaymas y Empalme; desde donde se incrementan gradualmente, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 30 a 40 m, se presentan en la porción noroccidental del valle, al norte del poblado Campo Nuevo (figura 4).

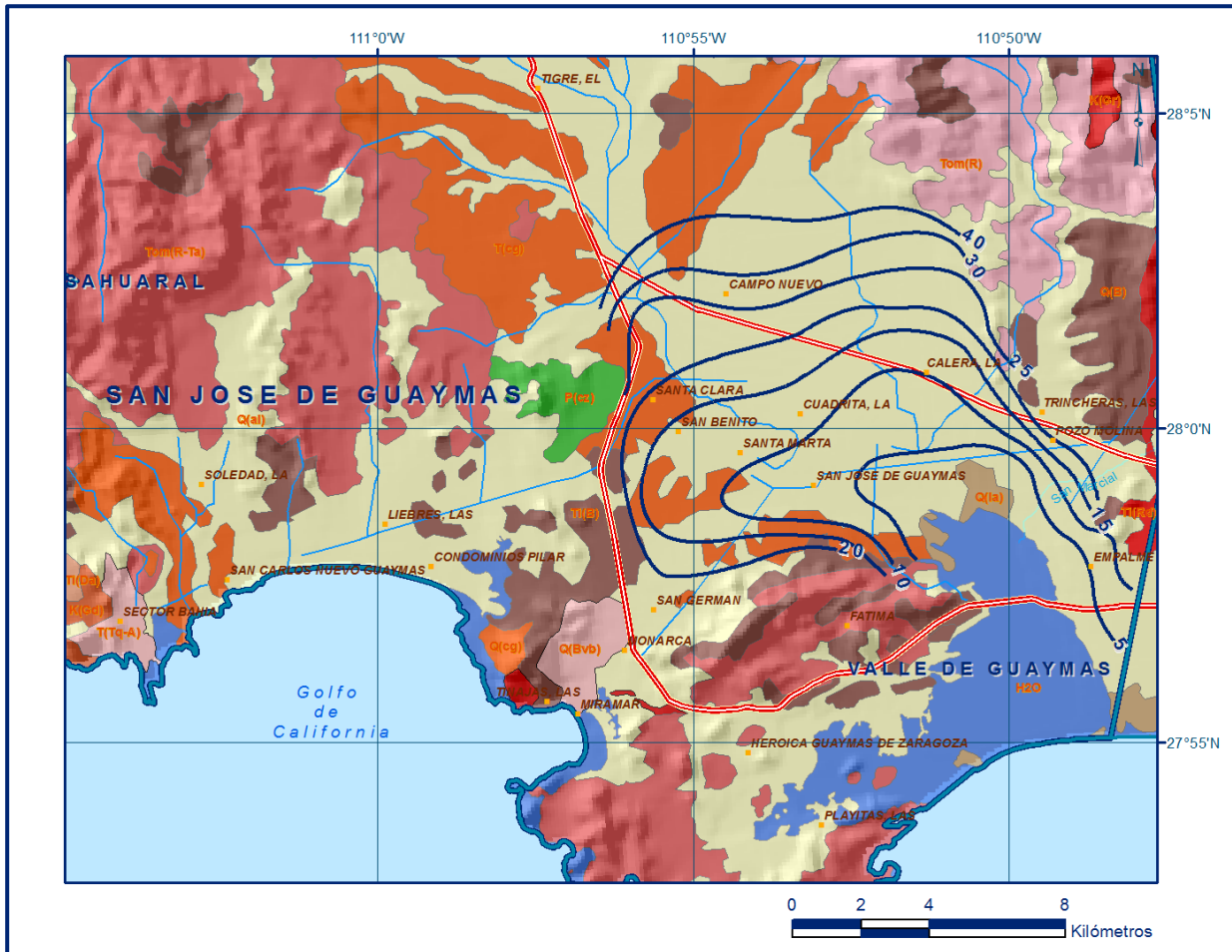


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 0 a -7 msnm. En la mayor parte de la superficie de explotación se presentan elevaciones por debajo del nivel medio del mar debido al avance de la intrusión marina; la cota de 0 msnm se localiza aproximadamente a 8 km de la zona costera de la Bahía de Guaymas. La configuración muestra una red de flujo radial y concéntrica hacia los conos piezométricos formados en torno al poblado Campo Nuevo, al este de San Martha y al noroeste de La Calera, definidos por las curvas de -3, -7 y -4 msnm, respectivamente, causados por la extracción intensiva (figura 5).

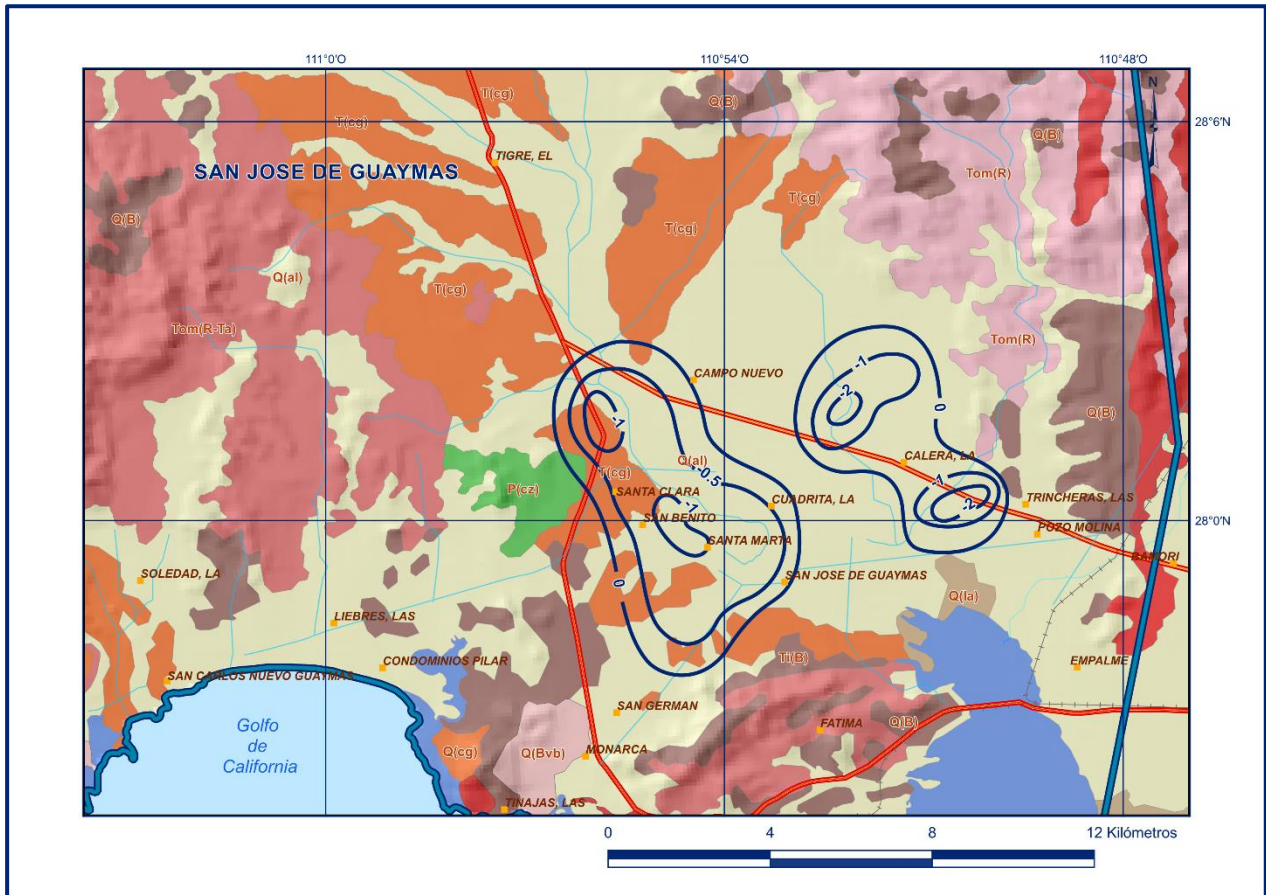


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019).

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2011, se tomaron 8 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para los análisis fisicoquímicos correspondientes. Las determinaciones de laboratorio incluyeron temperatura, pH, conductividad eléctrica, iones mayoritarios, salinidad, nitratos, dureza total, alcalinidad total, bromo, fluoruros

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que variaron de 409 a 2868 ppm, los valores se incrementan de norte a sur en el sentido de escurrimiento del arroyo San José, de manera similar a la dirección preferencial del flujo subterráneo. Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a agua de mar, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 907 a 6368 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la región centro-norte del acuífero y se incrementan en dirección general

hacia el sur, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo hacia la costa. Los valores de temperatura varían de 24.1 a 28.8 °C y los de pH entre 7.4 y 8.3.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las muestras analizadas se clasifican como C₂-S₁ y C₃-S₁, que representan agua de salinidad media a alta y contenido bajo de sodio intercambiable, que en general no es apta para la agricultura, salvo algunos cultivos resistentes a la salinidad en suelos con buen drenaje que requieren lavados periódicos.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias clorurada-cálcico-sódica y clorurada-sódica. En menor proporción se presenta la familia bicarbonatada-sódica, en aprovechamientos localizados en la zona centro-norte del acuífero. El contenido de calcio-magnesio, asociado con sulfatos, cloruros y sodio son la característica principal de las aguas que se extraen de la zona costera próxima al mar, en tanto que la presencia de bicarbonatos, sodio y calcio indican agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia. Se rebasa el límite máximo permisible que establece la norma mexicana en la concentración de STD, sodio, cloruros, sulfatos y magnesio.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2011, complementada con con información 2022 del Registro Público de Derechos del Agua (REPD) y volúmenes de extracción 2010-2022, proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 230 aprovechamientos del agua subterránea, 167 pozos y 63 norias. Del total de obras, 103 se utilizan para la agricultura, 103 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 23 para uso pecuario-doméstico y 1 para uso industrial.

El volumen total de extracción calculado es de **16.7 hm³/año**, de los cuales 8.6 hm³ (51.8%) son para uso agrícola, 7.9 hm³ (47.6%) para uso público-urbano, 0.1 hm³ (0.6%) para satisfacer las necesidades del uso pecuario-doméstico y 0.1 hm³ (0.6%) para uso industrial.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en una superficie de **96.2 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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 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 del acuífero:

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). Adicionalmente, debido a la intrusión marina, existe ingreso de agua salobre (Ehs) procedente de la franja costera.

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento (ΔVS) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

$$R_v + R_i + E_s - B - S_{sb} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v: Recarga vertical

E_s: Entradas por flujo subterráneo horizontal salobre (agua salobre)

R_i: Recarga incidental

B: Bombeo

S_{sb}: Extracción de agua salobre

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

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

$$R_v = B + S_{sb} \pm \Delta V(S) - R_i - E_s \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (E_{hs})

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

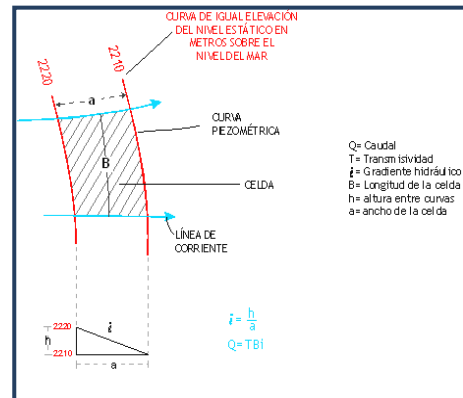
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce es de **9.1 hm³/año**.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (2019)

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)
Es1	2280	300	1	0.0033	0.0050	0.0380	1.2
Es2	2050	500	1	0.0020	0.0050	0.0205	0.6
Es3	2700	450	1	0.0022	0.0050	0.0300	0.9
Es4	2200	270	1	0.0037	0.0030	0.0244	0.8
Es5	2500	260	1	0.0038	0.0020	0.0192	0.6
Es6	1050	940	1	0.0011	0.0050	0.0056	0.2
Es7	2120	310	1	0.0032	0.0040	0.0274	0.9
Es8	1370	470	1	0.0021	0.0040	0.0117	0.4
Es9	1150	600	1	0.0017	0.0030	0.0058	0.2
Es10	1525	400	1	0.0025	0.0030	0.0114	0.4
Es11	1450	850	1	0.0012	0.0030	0.0051	0.2
Es12	1520	600	1	0.0017	0.0030	0.0076	0.2
Es13	1150	370	1	0.0027	0.0040	0.0124	0.4
Es14	3100	1050	1	0.0010	0.0050	0.0148	0.5
Es15	800	670	1	0.0015	0.0030	0.0036	0.1
Es16	2580	380	1	0.0026	0.0030	0.0204	0.6
Es17	2300	500	1	0.0020	0.0060	0.0276	0.9
TOTAL							9.1

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 15 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo. De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 8.6 hm³ anuales y que un 10% de éste recarga de manera efectiva al acuífero en las zonas que no tienen riego tecnificado, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 0.9 hm³ anuales. **Rr = 0.9 hm³ anuales.**

Por otra parte, las fugas de la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado varían en función del estado físico y antigüedad de las líneas de conducción, así como de la eficiencia en el sistema de abastecimiento. Para el caso de este acuífero, se considera que, del volumen para uso público-urbano, el 10% recarga de manera efectiva al acuífero. Si el volumen que se utiliza para uso público-urbano es de 7.9 hm³ anuales, la recarga por esta fuente es de **0.8 hm³ anuales**.

Por lo tanto, la recarga incidental es la suma de los retornos del riego agrícola y la recarga debida a las fugas en la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado, es decir, **Ri = 1.7 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo de agua dulce y salobre

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **16.7 hm³ anuales**.

7.2.1. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)

No existe información de la extracción de agua salobre; sin embargo, se considera que su volumen es al menos de la misma magnitud que el volumen de las entradas por flujo subterráneo de agua salobre procedente de la franja costera. Por lo tanto, **Ssb = 9.1 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV (S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.12$, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 96.2 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 0.6 hm³ anuales, es decir, un promedio anual de **0.1 hm³**.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
1	1	2.3	0.1	0.2
0.5 a 1	0.75	17.9	0.1	1.3
0 a 0.5	0.5	13.2	0.1	0.7
-2	-2	1	0.1	-0.3
-1 a -2	-1.5	4.9	0.1	-0.7
0 a -1	-0.5	11.9	0.1	-0.6
	TOTAL	51.5	TOTAL	0.6
		Promedio anual		0.1

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = B + S_{sb} \pm \Delta V(S) - R_i - E_{hs}$$

$$R_v = 16.7 + 9.1 + 0.1 - 1.7 - 9.1$$

$$R_v = 15.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de las entradas:

$$R = R_v + R_i$$

$$R = 15.1 + 1.7$$

$$R = 16.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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 incidental. Para este caso su valor es **16.8 hm³/año**, de los cuales 14.1 hm³ son recarga natural y 1.7 hm³ recarga incidental.

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 el caso del acuífero San José de Guaymas, no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 hm³ anuales**.

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 (REPGA), 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 **19,289,067 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 16.8 - 0.0 - 19.289067 \\ \text{DMA} &= - 2.489067 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su **déficit** es de **2,489,067 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2011. Estudio de impacto por el cambio climático en el avance de la interfase marina de los acuíferos costeros Valle del Yaqui, Cocoraque, Valle de Guaymas y San José de Guaymas. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2012. Situación actual de la intrusión marina en el acuífero San José de Guaymas, Sonora. Informe Técnico Interno

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Información piezométrica del acuífero San José de Guaymas, estado de Sonora.

Comisión Estatal del Agua de Sonora, 2008. Estudios geofísicos e hidrogeológicos para identificar sitios permeables para el diseño e instalación de obras de infiltración para el acuífero del Valle de Guaymas. Realizado por la Universidad de Sonora

Tecnológico de Sonora, 2000. Estudio de resistividad por Transitorio electromagnético, para definir la interfaz salina, en el Valle de Guaymas, Sonora. Realizado en el año 2000 por Consultores en Ingeniería Geofísica S.A. de C.V., (CIGSA).

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1984. Ampliación al estudio geofísico del Valle de Guaymas, Son. Realizado por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1985. Ampliación a la modelación matemática de las fuentes de abastecimiento para el suministro de agua en bloque a las ciudades de Guaymas, Empalme y San Carlos, Sonora. Realizado por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Servicio Geológico Mexicano, 2000 Carta Geológica-Minera H12-11 Sierra Libre. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 2008 Carta Geológica-Minera G12-8 Guaymas. Escala 1:250,000