

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO SAN MIGUEL (2625), ESTADO DE SONORA

Contenido

1.	GENERALIDADES	2
Antece	edentes	2
1.1.	Localización	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero	5
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	7
3.1.	Provincia fisiográfica	7
3.2.	Clima	9
3.3.	Hidrografía	10
3.4.	Geomorfología	11
4.	GEOLOGÍA	12
4.1.	Estratigrafía	14
4.2.	Geología estructural	19
4.3.	Geología del subsuelo	20
5.	HIDROGEOLOGÍA	22
5.1.	Tipo de acuífero	22
5.2.	Parámetros hidráulicos	22
5.3.	Piezometría	23
5.4.	Comportamiento hidráulico	23
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	23
5.4.2.	Elevación del nivel estático	25
5.4.3.	Evolución del nivel estático	27
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	30
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	30
7.1.	Entradas	30
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	3 ⁻
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	3
7.1.3.	Recarga incidental(Rr)	33
7.2.	Salidas	
7.2.1.	Bombeo (B)	
7.2.2.	1 3	
7.2.3.		
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	
8.	DISPONIBILIDAD	
8.1.	Recarga total media anual (R)	
8.2.	Descarga natural comprometida (DNC)	
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	
9.	BIBLIOGRAFÍA	39

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 Río San Miguel, definido con la clave 2625 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-norte del estado de Sonora, entre los paralelos 29°15′54" y 30°44′24" de latitud norte y 110°22′25" y 110°52′27" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,057 km². Limita al norte con los acuíferos Magdalena y Río Bacanuchi, al este con el acuífero Rio Sonora, al sur con Mesa del Seri-La Victoria, al noroeste con La Tinaja y al oeste con Rio Zanjón, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende casi la totalidad de los municipios de Cucurpe y Rayón; la mayor parte de San Miguel de Horcasitas y

Opodepe, así como porciones menores de Magdalena, Santa Ana, Ïmuris, Arizpe, Banámichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Aconchi, Ures y Hermosillo.

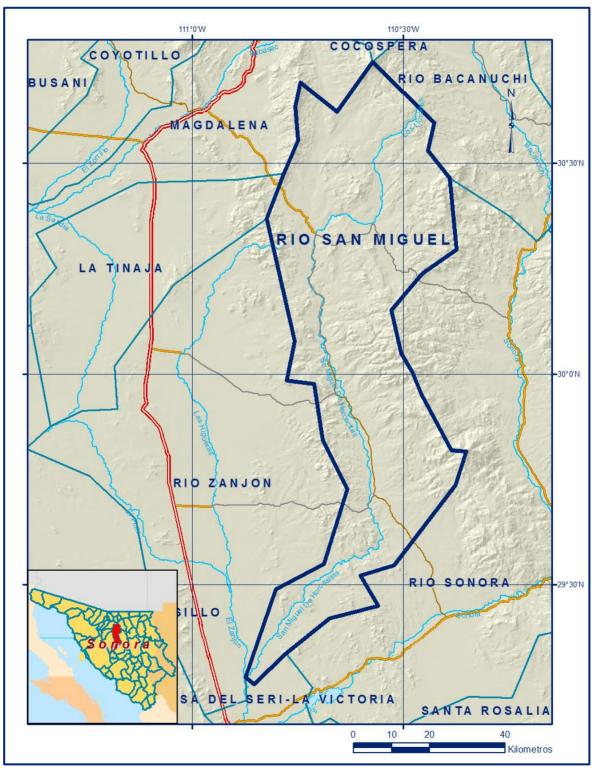


Figura 1. Localización del acuífero

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

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

ACUIFERO 2625 RIO SAN MIGUEL								
LIEDTICE	L	ONGITUD OES	TE	LATITUD NORTE				
VERTICE	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS		
1	110	25	35.0	30	35	46.9		
2	110	26	31.4	30	31	47.7		
3	110	23	26.0	30	27	52.2		
4	110	22	25.0	30	17	43.4		
5	110	27	17.0	30	14	19.8		
6	110	31	42.3	30	9	6.6		
7	110	30	19.3	30	3	1.3		
8	110	28	40.7	30	0	13.1		
9	110	27	31.1	29	57	15.2		
10	110	23	10.8	29	49	12.6		
11	110	21	5.4	29	48	59.7		
12	110	22	35.1	29	44	14.0		
13	110	31	18.7	29	32	47.4		
14	110	36	7.7	29	31	22.1		
15	110	33	33.5	29	27	5.0		
16	110	40	31.4	29	25	13.3		
17	110	46	42.8	29	20	16.2		
18	110	51	11.6	29	15	53.4		
19	110	52	26.8	29	16	51.0		
20	110	48	7.1	29	29	26.3		
21	110	41	16.5	29	32	57.5		
22	110	37	56.3	29	43	38.5		
23	110	41	27.8	29	50	35.9		
24	110	42	42.5	29	58	35.4		
25	110	46	38.2	29	59	6.1		
26	110	45	27.8	30	4	44.0		
27	110	49	28.3	30	22	6.9		
28	110	47	2.3	30	28	33.5		
29	110	44	57.2	30	33	14.3		
30	110	45	23.3	30	38	2.7		
31	110	44	37.8	30	41	28.8		
32	110	39	26.5	30	37	20.8		
33	110	34	22.4	30	44	23.3		
1	110	25	35.0	30	35	46.9		

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca Alto Noroeste, instalado el 19 de marzo de 1999. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda.

Casi la totalidad de él está regido por 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 DOF el 2 de junio de 1967. En una pequeña zona de su extremo norte rige el "Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dichas zonas", publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Ambas vedas se clasifican como tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

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 2. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie que cubre el acuífero no se localiza ningún distrito de riego; los usuarios se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero del Río San Miguel, A.C.

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 se distinguen los siguientes:

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PORCIÓN CENTRAL CUENCA DEL RÍO SONORA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS SONORA, SAN MIGUEL Y ZANJÓN, realizado en 1986 por la Residencia de Geohidrología y Zonas Áridas de la Delegación Estatal en Sonora de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Su objetivo fue evaluar los acuíferos localizados en las inmediaciones de la ciudad de Hermosillo para identificar fuentes alternas de agua subterránea para el abastecimiento de agua potable. Entre sus actividades más importantes destacan el censo e hidrometría de los aprovechamientos, ejecución de pruebas de bombeo, toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímico. Se identificó la presencia de fierro y manganeso, sulfatos, nitratos y

dureza en concentraciones superiores a los que estable las normas mexicanas para el agua destinada al consumo humano.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SONORA, ZANJÓN, SAN MIGUEL, MESA DEL SERI-LA VICTORIA Y CUENCA BACOACHITO. Elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora en 2005.

Incluye actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría y nivelación de brocales. Para el caso del acuífero Río San Miguel, lo divide en dos zonas: Horcasitas y Rayón-Opodepe. En la primera se detectaron zonas con abatimiento promedio de 0.2 m/año. Se recomienda la prospección geohidrológica para conocer el potencial de las rocas fracturadas y en la zona cercana a Hermosillo intensificar el monitoreo hidrodinámico e hidrogeoquímico.

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE "LA VICTORIA" COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, realizado en 1990por GYMSA Estudios de Planeación Regional S.A de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue determinar la geometría del acuífero y sus características hidrodinámicas de recarga y descarga, determinar las causas del termalismo y sus implicaciones en la calidad de agua, realizar el balance geohidrológico y construir un modelo de simulación para predecir el comportamiento del acuífero ante diferentes escenarios de extracción. Entre sus actividades de campo más importantes destacan el censo e hidrometría de las extracciones, piezometría, nivelación topográfica de los brocales de los pozos, ejecución de pruebas de bombeo y de sondeos geofísicos y toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos e isotópicos. Concluye que el acuífero está constituido por diferentes horizontes comunicados entre sí y permitiendo el flujo vertical entre ellos, alojado en una cuenca tectónica. Calcula un volumen de extracción de 72 Mm³ anuales mediante un total de 382 aprovechamientos.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA, 2005. Elaborado por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue establecer una red de monitoreo piezométrico para cada uno de los acuíferos que son jurisdicción administrativa del Organismo de Cuenca Noroeste. Como parte de este este estudio se elaboraron mapas temáticos de clima, precipitación, temperatura, geología, geomorfología, vegetación y uso de suelo, así como de configuración del nivel estático (profundidad, elevación y evolución)

mostrando las direcciones de flujo subterráneo. Es un estudio de consulta general de los acuíferos.

ESTUDIO DE PIEZOMETRÍA Y EVOLUCIÓN DE NIVELES, EN LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RÍO SONORA, MONITOREO. Elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora en 2006. Entre sus conclusiones más importantes destaca que en la mayor parte de la superficie del acuífero se registró una recuperación de los niveles del agua subterránea; recomienda realizar un censo exhaustivo de aprovechamientos en los acuíferos.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA EL PROYECTO MINERO "EL CRESTÓN", MUNICIPIO DE RAYÓN, ESTADO DE SONORA. PRIMERA ETAPA: FACTIBILIDAD HIDROGEOLÓGICA, elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS) para Exploraciones Global, S.A de C.V en 2008. El objetivo general de este estudio fue definir las condiciones geohidrológicas del acuífero, calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, pruebas de bombeo, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DE ACUÍFERO RÍO SAN MIGUEL, SONORA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, así como la hidrometría de las extracciones.

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), la superficie del acuífero se localiza en dos Provincias Fisiográficas: la cuenca alta y media pertenecen a la Provincia Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Valles del Norte; y la cuenca baja a la Provincia Desierto o Llanura Sonorense, Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

La Sierra Madre Occidental es una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. En sus 1500 km de

longitud recorre Arizona, parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal de México. Cubre 289,000 km² y ocupa la sexta parte del territorio mexicano. Se formó en el Terciario Inferior o Medio a partir de la extrusión a gran escala de los materiales volcánicos principalmente de composición ácida cuyos espesores se calculan de 1,500 a 1,800 m, que cubren rocas sedimentarias más antiguas. Su borde occidental, muestra pendiente pronunciada imponente, mientras que hacia el oriente tiene un descenso gradual hasta las regiones llanas del centro.

Sobre el dorso central de la sierra, que se levanta de 2,500 a 3,000 msnm, los materiales volcánicos se encuentran depositados en amplios mantos tendidos que forman las elevadas mesetas típicas de la provincia. Una particular conjunción de actividad tectónica, rasgos litológicos, distribución de fracturas y procesos erosivos hídricos, propició la excavación de profundos cañones cuyos ejemplos más espectaculares se presentan sobre la vertiente occidental de la sierra. Los sistemas de topoformas dominantes en toda la provincia son mesetas y mesetas asociadas con cañones. En la franja oriental existen cadenas montañosas y valles con orientación noreste-suroeste, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento durante el Pleistoceno.

La Subprovincia Sierras y Valles del Norte está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, de tal forma que en la sierra Los Ajos, ubicada al Este de Cananea, se localiza la mayor altitud, con 2,620 msnm; al norte de Mazocahui gran parte de las elevaciones exceden los 1,000 msnm, mientras que al sur de esta población las cimas presentan menos altitud.

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 (menores de 700 msnm) 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 clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), se determina que el clima que predomina en la mayor parte de la superficie que cubre el acuífero es BS1h(x') semiárido, semicálido con temperatura entre 18°C y 22°C, y mayor de 18°C, respectivamente; temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Las lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

En las regiones topográficamente más altas de la porción norte y oriental, el clima es BS1k(x'), semiárido, templado; con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18°C, temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Régimen de lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. Hacia la cuenca baja dominan los climas BSoh(x'), árido semicálido, BSo(h')(x')árido cálido y BWh(x') muy árido, semicálido; en los que la temperatura media anual varía de 18 y 22°C, la temperatura del mes más frío es menor de 18°C y temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Las lluvias se encuentran repartidas todo el año y el porcentaje de lluvia invernal mayor 18% del total anual.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos periodos de ocurrencia, uno de junio a septiembre 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 cuenta con información de 8estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Bacanuchi, Banámichi, Cucurpe, Rayón, El Cajón, Querobabi, Hermosillo Norte e Ímuris; con registro 1981-2015. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son **21.4** °C, **520 mm y 1725 mm**, respectivamente. La temperatura media anual más baja se registró en la estación Bacanuchi con 17.2 °C y la más cálida en la estación de Hermosillo Norte con 25.9 °C. Los valores más altos de precipitación se registraron en la estación Cucurpe, ubicada en la porción centro-norte del acuífero, con 534.7 mm, mientras que la lámina más baja se presenta en la estación Hermosillo Norte, con 345.2 mm anuales.

3.3. Hidrografía

El acuífero Río San Miguel se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 9 "Sonora Sur", cuenca del Río Sonora, subcuencas Río San Miguel.

El rasgo hidrográfico más notable es el río Sonora, que se origina en la Sierra de Cananea, presenta una orientación N-S hasta el poblado de Mazocahui, en donde cambia bruscamente de dirección hacia el suroeste, hasta verter sus aguas en la presa Rodolfo Félix Valdez, que controla las avenidas provenientes de las partes altas y después son drenadas hacia la presa Abelardo L. Rodríguez y es ahí donde el río San Miguel se le une por su margen derecha. El río Sonora ocupa el tercer lugar en la Región Hidrológica 9, Sonora Sur en cuanto a extensión de cuenca y magnitud de aportaciones, que se almacenan y regularizan en las presas "El Molinito" y Abelardo Rodríguez Luján; hasta esta última su área de captación es de 21,035 km².

La subcuenca del Río San Miguel está formada por el área de captación de este río con el Río Zanjón; cuya confluencia se localiza aguas arriba de la presa Abelardo Rodríguez Luján, al noreste de Hermosillo. El río San Miguel se origina al norte de la comunidad de Cucurpe, en el parteaguas con el arroyo Cocospera, en la Sierra Azul, a una elevación de 1,200 msnm y su curso general es hacia el sur, el que descarga por su margen derecha, aguas arriba del sitio en que se localiza la cortina de la presa. En la cercanía de Rayón cambia su curso al suroeste hasta la ciudad de Hermosillo. También confluye a la presa el Río Sonora; su aportador más importante es el Río San Miguel, cuya cuenca tiene un área de 8,427 km², que representa el 40% del área drenada hasta la presa.

Los principales aportadores del Río San Miguel son el Río Saracachi y el Río Zanjón, que nacen en el parteaguas común con los ríos San Miguel y Al arroyo La Tinaja, situados al oriente de la cuenca del Río Asunción, en el Cerro Encarnado, a una elevación de 1,780 msnm. Los escurrimientos del Río San Miguel se miden en la estación hidrométrica El Cajón, en la cual se tiene registrado un escurrimiento medio anual de 37.5 hm³.

3.4. Geomorfología

De acuerdo a la clasificación de Lugo Hubp (1990) la Provincia de Sonora es una región que fue afectada por orogenias en el Precámbrico, el Paleozoico y el Mesozoico. En ella predomina una planicie aluvial y de pie de monte, sobre la que se asientan montañas, las cuales son de menores dimensiones, en área y altura, hacia la costa y aumentan hacia el oriente; producto de la deposición de los sedimentos acumulados por el río Sonora desde Hermosillo hasta la costa.

La geomorfología del acuífero es producto de patrones geológicos estructurales resultante de la tectónica que han sufrido las rocas a través del tiempo geológico. Las grandes estructuras geológicas (fallas y estructuras) son las que controlan la mayoría de los cambios en la dirección de las principales corrientes de las cuencas, ya que los ríos siguen estas zonas de debilidad. Estructuralmente la cuenca del río Sonora presenta como patrón regional un sistema de fallas paralelas en dirección general NW-SE, el cual corresponde al tipo Basin and Range Sonorense.

Las principales formas morfológicas que se encuentran expuestas en la región están representadas por valles, sierras y terrazas. Los valles están constituidos por materiales de relleno terciarios y cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas y las terrazas por conglomerados. Se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación noreste-sur, separadas entre sí por valles angostos. La zona norte está comprendida por la existencia de amplias cadenas montañosas separadas por valles intermontanos que estructuralmente representan bloques desplazados por fallas normales. Las principales depresiones topográficas se localizan en la mitad occidental del área, entre las que destaca el graben Los Pinos, relacionado con estructuras lineales de dimensiones regionales en las que se encuentran los principales arroyos que drenan el área. Rellenando dichos valles, existe una unidad constituida por conglomerados polimícticos y areniscas con intercalaciones de tobas riolíticas. En la parte central es posible reconocer las sierras Aconchi y Los Locos con elevaciones máximas de 2180 msnm.

4. GEOLOGÍA

A nivel regional afloran rocas con edades que varían del Precámbrico al Holoceno. Las rocas más antiguas se localizan en la porción noroeste, están representadas por un complejo metamórfico del Proterozoico Inferior (esquistos, gneises, cuarcitas y anfibolitas) y constituyen el basamento cristalino de la región. En la misma porción, aflora un segundo conjunto representado por granitoides del Proterozoico Medio constituido por un granito porfídico con deformación a augen gneis milonítico y por ortogneis cuarzo feldespático de biotita. En la Sierra de Mazatán ha sido fechado en 1,475 ± 29 Ma (Damon y Radelli, 1986). En la porción noreste se presentan rocas intrusivas graníticas precámbricas, que intrusionan a la unidad anterior y que por sus características litológicas son correlacionables con el Granito Aibó, fechado por Anderson y Silver (1971) en 1,100 Ma. De esta misma edad, existen areniscas, calizas, areniscas y dolomías que afloran en las porciones centro-noreste, centro y centrosureste (figura 2).

En la porción centro-noreste Stoyanow (1942), con base en la identificación de restos fósiles de arrecifes de algas Collenia, las ubicó en el Proterozoico Superior. En la porción central se tienen afloramientos en la localidad Ranchito de Aguilar-La Palma, donde se les asignó una edad del Proterozoico Superior con base en la presencia de estromatolitos en las dolomías de la parte superior de la secuencia.

La secuencia paleozoica que sobreyace discordantemente consiste principalmente de calizas y areniscas depositadas en un ambiente de plataforma. Sus afloramientos se agrupan en dos franjas: la primera con orientación NW-SE se extiende desde el poblado El Saucito hasta la ciudad de Hermosillo; la segunda franja tiene una orientación norte-sur y se extiende desde el oriente del Poblado Carbó hasta el Rancho Las Norias, ubicado al oriente de Hermosillo. Las rocas calcáreas fueron posteriormente afectadas por procesos metasomáticos asociados con el emplazamiento de grandes intrusivos de dimensiones batolíticas, originando cuerpos de skarn y mármol. Se presentan como pequeños cuerpos aislados en forma de techos colgantes de dimensiones y espesores variables, principalmente en las localidades La Lorena y El Joma.

El Mesozoico está representado por una secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior, formada por calizas y areniscas muy metamorfoseadas que afloran aisladamente sobre las rocas graníticas del batolito regional. Esta secuencia está cubierta discordantemente por cuatro unidades de rocas volcánicas y vulcanosedimentarias

de edad Cretácico Superior-Paleoceno, correlacionables con la Formación Tarahumara mejor estudiadas en la porción centro-oriental de Sonora. La composición de estas unidades varía de intermedia a félsica y consisten de coladas andesíticas y riolíticas, andesitas con intercalaciones de conglomerados, areniscas y calizas. La relación con las rocas más antiguas es discordante, y por falla normal y discordante con las rocas volcánicas del Terciario.

Todas las unidades anteriormente mencionadas se encuentran afectadas por una serie de intrusivos calcoalcalinos que constituyen lo que regionalmente se define como "Complejo Batolítico de Sonora", al cual se asignan edades del Paleoceno (67 a 55 Ma). Este complejo está representado por un monzogranito, que presenta una deformación indicada por una esquistosidad penetrativa y una lineación mineral que lo define como una unidad más antigua, a su vez intrusionada por un granito de biotita con facies de granodiorita y monzonita. Estos intrusivos están afectados a su vez por troncos de diorita-granodiorita, pórfidos de composición riolítica y cuarzomonzonítica; Así como también por un granito de muscovita con biotita que se fechó en 36 Ma (Damon in Roldán, 1974), en una localidad del distrito minero San Felipe.

Como producto de una última magmática, se genera una serie de diques aplíticos-pegmatíticos y andesíticos que se emplazaron en las rocas preexistentes. Del Mioceno inferior se identificó en el extremo oriental un afloramiento de basalto, con variaciones a andesita basáltica, que comúnmente presenta vesículas rellenas parcial o totalmente de zeolitas, que le confieren un color blanquecino. Los depósitos sedimentarios clásticos continentales del Mioceno están constituidos por conglomerado y arenisca, correlacionables con la Formación Báucarit y se encuentran cubriendo a las rocas más antiguas; expuestos en afloramientos escasos de poca extensión que cubren a las rocas más antiguas.

En el Mioceno durante el evento distensivo y debido a la erosión de los bloques levantados, se deposita una alternancia de conglomerados polimícticos, areniscas y escasos lentes de basalto, conocida como Formación Báucarit (Dumble 1900, King 1939), que aflora con poco basculamiento en varias localidades. Esta formación sobreyace en discordancia a las rocas volcánicas del Terciario, a la secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico y a las rocas intrusivas laramídicas; se encuentra parcialmente cubierta al oriente de Hermosillo por flujos de basalto y tobas riolíticas de edad Terciario Tardío.

Regionalmente se considera que los sedimentos clásticos rellenaron cuencas continentales limitadas por fallas normales, atribuidas a la extensión tectónica del Terciario tardío, con episodios volcánicos durante el depósito de los sedimentos. Cubriendo a las rocas anteriores se presenta la unidad de toba riolítica y riolita del Mioceno, expuesta en afloramientos extensos en la porción central y oriental, que se correlaciona con la Formación Lista Blanca, fechada por K/Ar entre 10.4 ± 0.2 Ma y 12.3 ±1.2 Ma en la región centro-oriental de Sonora.

El Cuaternario está representado por la acumulación de espesor variable de conglomerado polimíctico semiconsolidado, que se depositó en los valles. Por último, el aluvión cubre el cauce del río San Miguel de Horcasitas y Sonora y sus llanuras de inundación, así como algunos de sus afluentes (Cartas Geológico-Mineras "Hermosillo" H12-8. Escala 1:250,000. SGM, 1999, y Opodepe H12-D12, escala 1:50,000, SGM 1999).

4.1. Estratigrafía

Las unidades litoestratigráficas que afloran en el acuífero del Río San Miguel varían en edad del Precámbrico al Reciente y están representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, metamórficas y sedimentarias marinas y continentales (figura 2). A continuación, se hace una breve descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

PRECÁMBRICO

Conjunto de rocas ígneo-metamórficas, constituidas por gneises cuarzo feldespáticos de biotita y un granito porfídico con facies de augen gneis milonítico. Aflora en la región norte del acuífero, al poniente del poblado de Santa Margarita (específicamente alrededor del cerro "El Crestón") y al noreste de Opodepe, en forma de pequeños cuerpos sobre el granito del batolito regional. Comúnmente el granito está metamorfizado formando gneis milonítico y augen gneis milonítico de color verde rosado, presenta bandas milimétricas de cuarzo y bandas rosadas a oscuras de feldespatos y biotita.

La secuencia se formó a partir de rocas intrusivas, de edad aproximada de 1,800 Ma, que fueron metamorfizadas hace 1,675 Ma (Rodríguez, 1984) y pueden representar la continuación hacia el sur del basamento cristalino Precámbrico de Caborca. Según la edad reportada en la porción sureste indica que esa parte es contemporánea con una serie de plutones graníticos porfídicos definida en Sonora norte y central (Anderson y Silver, 1981).

PROTEROZOICO

Secuencia formada por areniscas cuarzofeldespáticas, ortocuarcitas, cuarcitas y conglomerados, que gradúan hacia la cima a intercalaciones de arenisca de grano fino, con ocasionales horizontes de lodolita y alternancia de dolomía. Su espesor medido es de 800 m, aunque se estima que posiblemente sea de aproximadamente 1500 m (Figueroa y Grijalva, 1989). Generalmente, la unidad se presenta plegada y fuertemente fracturada en diferentes direcciones, con zonas de metamorfismo de contacto causadas por intrusivos, que forman hornfels silíceos y metareniscas de cuarzo. Sobreyace discordantemente y por contacto tectónico a la unidad de granitogneis del Precámbrico y subyace en discordancia tectónica a las rocas volcánicas del Cretácico Superior-Eoceno. También es cubierta discordantemente por rocas volcánicas del Terciario, por un conglomerado polimíctico del Cuaternario y es afectado por los intrusivos laramídicos. Stoyanow en 1942 ubicó a esta secuencia en el Proterozoico Superior con base en la presencia de fósiles de algas Collenia y estromatolitos en las dolomías de la parte superior de la secuencia. Se correlaciona con las rocas sedimentarias del Grupo El Águila y las formaciones Cuarcita Proveedora y Cerro Prieto; así como con el Grupo La Palma que aflora en la región de Rayón, ubicada al sureste, y con rocas similares en la zona de Caborca.

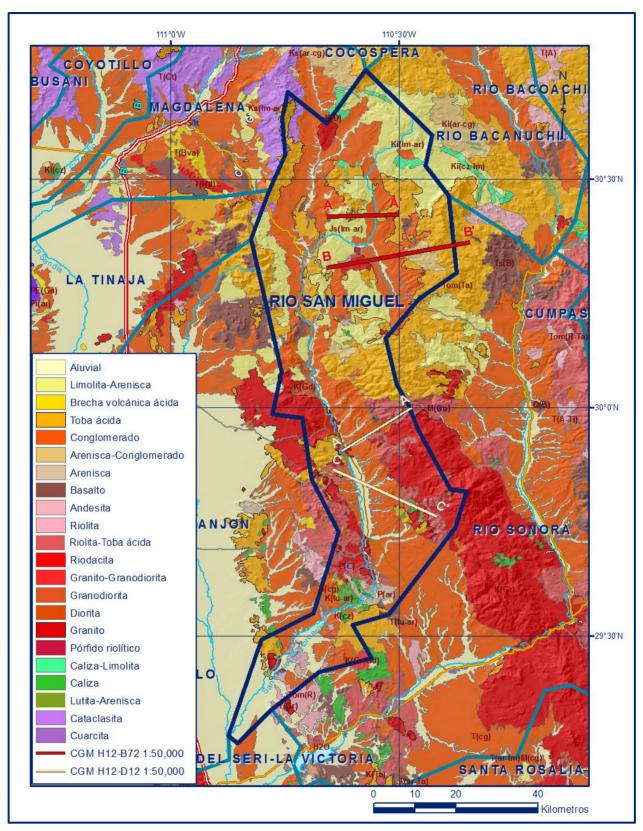


Figura 2. Geología general del acuífero

PALEOZOICO

Está representado por rocas sedimentarias de plataforma somera: calizas y areniscas con o sin la presencia de lutitas y pedernal. Sus afloramientos se encuentran dispersos en la porción este y sureste del acuífero, al oeste entre la Sierra Bacha y Sierra Seri, y en Hermosillo. Las edades de estas rocas varían del Cámbrico al Pérmico y se consideran discordantes sobre las rocas proterozoicas, aunque esta relación es dudosa, ya que puede existir una continuidad sedimentaria entre las rocas del Proterozoico Tardío y del Paleozoico. Las calizas son de color gris claro que intemperizan en gris oscuro, presentan estratificación delgada a gruesa, en ocasiones recristalizadas y silicificadas con nódulos y lentes de pedernal de 2 a 20 cm; contienen abundantes crinoides de edad misisípica y algunos fragmentos de pelecípodos.

MESOZOICO CRETÁCICO

Está representado por una secuencia sedimentaria de calizas y areniscas metamorfoseadas que afloran de manera aislada sobre las rocas graníticas del batolito regional. De esta misma edad son los intrusivos de composición granítica y granodiorítica que por su composición mineralógica de cuarzo, feldespatos y micas los clasifican como granitos de muscovita y hornblenda. Presentan color gris claro al fresco que intemperizan a color crema, textura fanerítica equigranular que ocasiones puede ser porfídica. La unidad constituye una gran estructura batolítica que en superficie denota una orientación noroeste-sureste; cortada por una serie de diques de composición ácida y básica que se identifican como crestones de diferente tonalidad, sobresaliendo de la roca granodiorítica a lo largo de varios kilómetros.

Sobreyaciendo discordantemente a estas rocas afloran secuencias de rocas volcánicas de composición intermedia y vulcanosedimentarias: andesitas y areniscas con horizontes de calizas del Cretácico Superior, que se correlacionan con la parte media de la Formación Tarahumara (Wilson&Rocha, 1946).

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 un punto de vista petrogenético, se trata de una serie calcoalcalina emplazada en un ambiente de arco continental

durante la "Orogenia Laramide". Para el área de Hermosillo varios autores han determinado edades de 64 Ma, la cual es aproximadamente la base del Paleoceno (Harland *et al.*, 1989).

TERCIARIO

En el Oligoceno se emplazaron importantes volúmenes de rocas volcánicas de composición félsica. Estas rocas se encuentran en afloramientos discontinuos, desde escasos kilómetros al oeste de Hermosillo, hasta el extremo sur del área. En algunas localidades ubicadas en la porción central y centro-occidental también existen andesitas y basaltos. Las rocas del Mioceno han sido agrupadas en seis diferentes unidades. En el área del acuífero se identifican tres litologías principales características de un vulcanismo bimodal:

Ignimbritas

Roca de coloración rosa claro al fresco que intemperiza a color amarillo pardo o en ocasiones rojo ocre; de textura porfídica, compuesta principalmente por vidrio, cuarzo, feldespato, ceniza e hidróxidos de hierro y aspecto masivo y compacto. Presenta fracturamiento cerrado de densidad baja a moderada, que en otras ocasiones está abierto y relleno por material arcillo-arenoso.

Andesitas

Roca muy compacta de color gris oscuro a verde oscuro que intemperiza a gris claro o pardo, presenta una textura totalmente afanítica, la mineralogía comprende plagioclasas y olivino en etapa de oxidación, su aspecto es masivo y compacto. Se presenta sumamente alterada en la que es posible observar una cierta recristalización de los minerales, principalmente donde se presenta la oxidación, lo que le imprime un grado más fuerte de erosión. Su densidad de fracturamiento es de moderada a baja y sus planos por lo general son cerrados y poco profundos.

Basalto

Roca masiva y compacta de color gris oscuro a negro que intemperiza a amarillo pardo, presenta una textura afanítica y en ocasiones estructura vesicular. Su densidad de fracturamiento es de moderada a baja, sus planos por lo general son cerrados y poco profundos.

Formación Báucarit.

En el Mioceno durante el evento distensivo y por la erosión de los bloques levantados, se deposita una alternancia de conglomerados polimícticos, areniscas y escasos lentes de basaltos, conocida como Formación Báucarit (Dumble, 1900, King, 1939), que aflora con ligero basculamiento en varias localidades. Esta formación sobreyace en discordancia a las rocas volcánicas del Terciario, a la secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico y a las rocas intrusivas laramídicas; se encuentra parcialmente cubierta al oriente de Hermosillo por flujos de basalto y tobas riolíticas de edad Terciario Tardío. Esta unidad de rocas aflora en la parte norte del área, en los alrededores del rancho Guadalupe y Cerro Prieto, así como en el extremo centro-este del área, al norte del cerro Los Amoles.

Del Mioceno-Plioceno se presentan flujos de rocas volcánicas de composición riolítica ocasionalmente con derrames de andesita, que sobreyacen a una secuencia compuesta de conglomerados y areniscas pertenecientes a la Formación Báucarit. Aflora en la porción centro-oriental del área, específicamente en el Cerro Pinto, localizado al norte del rancho Salas. Su afloramiento corresponde a flujos volcánicos compuestos por riolita, toba ignimbrítica y esporádicos derrames de composición andesítica. Sus relaciones estratigráficas son cubriendo discordantemente a la secuencia vulcanosedimentaria, así como al granito laramídico; sobreyace concordantemente y en contacto tectónico a la Formación Báucarit, además es cubierto en discordancia por la secuencia de conglomerática del Cuaternario.

CUATERNARIO

Unidad formada por conglomerados polimícticos poco consolidados, depositados en los valles, principalmente en el del río San Miguel y sus afluentes, que se presenta en una franja orientada en sentido NW-SE. Su espesor varía desde algunos metros hasta 100 m. Se encuentran cubriendo en discordancia a todas las rocas preexistentes que afloran en el área y se le asigna una edad correspondiente a Pleistoceno. De esta misma unidad se considera a los depósitos aluviales que constituyen los cauces de ríos y arroyos, compuestos por gravas, arenas y depósitos lacustres que cubren a la Formación Báucarit y en algunas localidades a otras rocas preterciarias.

4.2. Geología estructural

Las principales estructuras que se observan en la región se formaron por diferentes eventos tectónicos. La deformación más antigua ocurrió en el Precámbrico acompañada por metamorfismo regional, seguidos por una fase de deformación post-

metamorfismo regional que afectó a las rocas metamórficas precámbricas, creando un plegamiento en la foliación existente, la segunda fase compresiva se llevó a cabo durante la Orogenia Mesocretácica, evidenciada por la discordancia existente entre la secuencia del Cretácico Inferior y la secuencia Vulcanosedimentaria del Cretácico Superior. Posteriormente, en el Cretácico Superior-Terciario Inferior, se produce un evento compresivo asociado a la Orogenia Laramide que deforma a las secuencias precretácias. Este evento y el intenso magmatismo contemporáneo que produce el emplazamiento de los cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, están asociados a cambios cinemáticos ocurridos al nivel de la subducción de la Placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana.

Posteriormente, durante el Oligoceno-Mioceno, se desarrolla un evento tectónico distensivo que dio origen a la formación de sierras y valles paralelos que caracterizan la morfología actual.

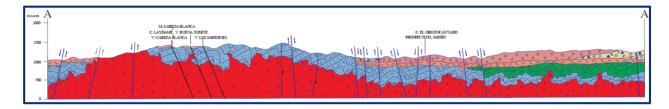
En imágenes de satélite se identifican varios sistemas de fracturamiento y fallamiento, uno predominante de rumbo NW-SE, relacionado con los primeros con los eventos distensivos y otros con eventos comprensivos. De la misma manera se definen grandes estructuras curvilíneas asociadas a intrusiones dómicas (Carta Geológico-Minera "Opodepe" H12- D12, escala 1:50000, SGM 1999) Estructuralmente existen rasgos circulares regionales como los observados en la zona El Caliche, con direcciones N-S y NE-SW, además de curvilineamientos, plegamientos y lineamientos con orientación general NW-SE y una gran cantidad de fallas y fracturas, orientadas paralelamente a la posible traza de la Megacizalla Mojave-Sonora.

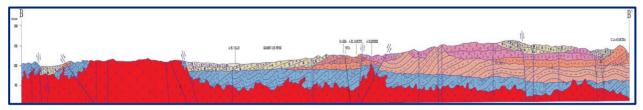
La intensa deformación en las rocas de la cuenca del Jurásico-Cretácico Inferior, en la que se observan localmente pliegues de arrastre y fallas, evidencian un fuerte evento tectónico, ocurrido posiblemente durante el Cretácico Medio (Orogenia Mesocretácica), al que diversos autores se han referido, mencionando la existencia de cabalgaduras de las rocas de cuenca sobre las de plataforma, constituidas por el Grupo Bisbee, que en esta zona presenta pliegues amplios y abiertos. El evento distintivo se denomina "Basin and Range", originó pilares y fosas con rumbo general NW-SE a N-S (Carta Geológico-Minera "Saracachi" H12-B72, escala 1:50000, SGM 1999).

4.3. Geología del subsuelo

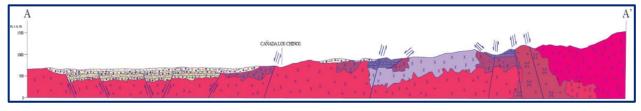
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero, es posible definir que el acuífero está conformado por dos unidades que

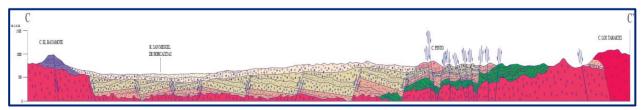
presentan conexión hidráulica entre ellas. La porción superior está constituida por sedimentos fluviales, aluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos, arroyos y abanicos aluviales, cuyo espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose gradualmente hacia las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, hasta alcanzar varias decenas de metros en el centro de los valles. La porción inferior se aloja en un medio fracturado conformado por rocas sedimentarias, volcánicas y vulcanosedimentarias, así como rocas ígneas intrusivas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración; cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas ígneas, sedimentarias, extrusivas e intrusivas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración. El basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas (figura 3).





FUENTE: Carta Geológico-Minera: H12-B72 "Saracachi" Escala 1:50.000 (SGM, 1999).





FUENTE: Carta Geológico-Minera: H12-D12 "Opodepe" Escala 1:50.000 (SGM, 1999) Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre**, conformando un medio heterogéneo y anisotrópico, alojado en un sistema de fosas y pilares tectónicos; constituido por dos medios: el superior de tipo granular y el inferior fracturado.

El medio granular poroso está conformado por los depósitos no consolidados y semiconsolidados que incluyen materiales clásticos y conglomerados polimícticos, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona, estos materiales presentan permeabilidad media a alta y se ubican en la proximidad del cauce de los ríos y arroyos en donde alcanzan su mayor espesor que es de decenas de metros.

El medio fracturado está constituido por rocas sedimentarias, volcánicas, vulcanosedimentarias e ígneas intrusivas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento y alteración. Las rocas intrusivas cuando presentan fracturamiento y alteración son capaces de trasmitir y almacenar el agua de lluvia.

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 en este acuífero y los vecinos que tienen el mismo origen y constitución geológica (SARH, CONAGUA, UNISON). Como parte de las actividades de los estudios realizados en 2005 y 2008, se ejecutaron 9 pruebas de bombeo de corta duración, principalmente en norias, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de 150 x10⁻³ a 9.2 x 10⁻³ m²/s (12960 a 795 m²/d). Los valores más altos corresponden a los depósitos aluviales de granulometría gruesa que conforman el cauce del río y arroyos. De acuerdo con el espesor saturado la conductividad hidráulica varía de 0.000837 a 0.015 m/s (72.3 a 1296 m/d).

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Para el balance de aguas

subterráneas, de acuerdo a la litología de los materiales que conforman las zonas aledañas al subálveo del río San Miguel, de adoptó un valor de rendimiento específico de **0.1**.

En el acuífero vecino Río Zanjón, que tiene el mismo origen y constitución geológica, las pruebas de bombeo realizadas en pozos aportaron valores de transmisividad de 3.2 x10-4 a 2.0 x10-2 m²/s, dependiendo de la granulometría de los depósitos aluviales y fluviales; en tanto que lo valores de conductividad hidráulica varían de 1.03 x-6 a 2.0 x10-5 m/s (0.09 a 1.70 m/d). Las pruebas de bombeo realizadas en la porción sur del acuífero, en la zona de Pesqueira, que contaron con pozo de observación e interpretadas por el modelo numérico, aportaron valores de rendimiento específico de 0.03 a 0.09.

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 el año 2000, además de registros históricos durante el periodo 2008-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Noroeste. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2013-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la profundidad al nivel del agua subterránea, el año 2019 presentó valores que variaron de 2 a 100m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía del cauce del río Zanjón hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle. Los niveles estáticos más someros, de 2 a 10 m, se registran a lo largo del cauce del río San Miguel y de algunos arroyos tributarios; desde Opodepe hasta la zona de confluencia con el río Zanjón, desde donde se incrementan gradualmente hacia los extremos este y oeste, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 60 a 90 m, se presentan en el extremo suroccidental del acuífero, entre las localidades Tierras Nuevas y El Torreón (figura 4).

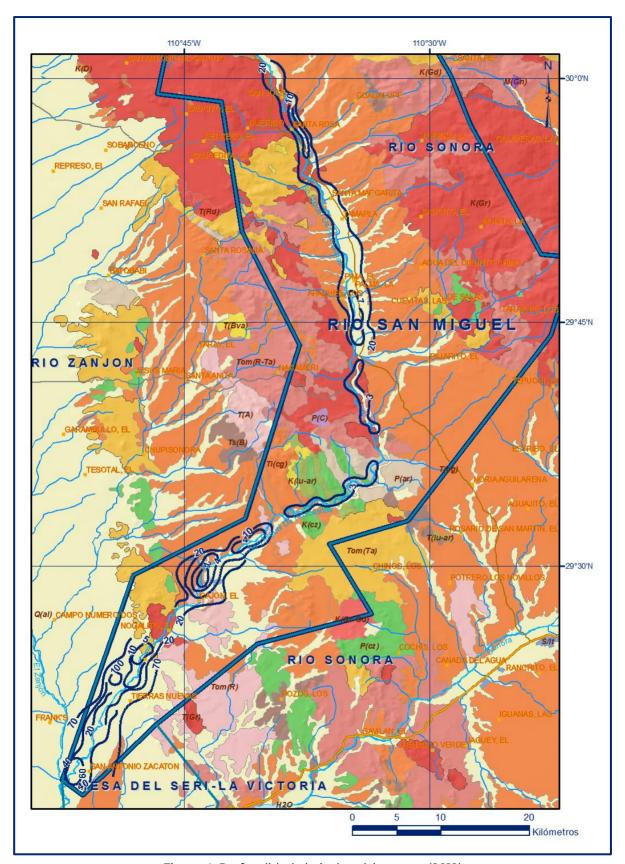


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 680 a 270 msnm, decreciendo desde la porción centro-norte del acuífero, en la zona de Opodepe hacia la región central y suroccidental. Los valores más altos, 600 a 680 msnm se presentan en la porción centro-norte y oriental, al norte de Opodepe y al oriente de Rayón, desde donde descienden gradualmente hacia el sureste y oeste, respectivamente mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo N-S, paralela al escurrimiento del río San Miguel, con alimentaciones provenientes principalmente del flanco, en dirección hacia el límite con los acuíferos Río Zanjón y Mesa del Seri-La Victoria (figura 5).

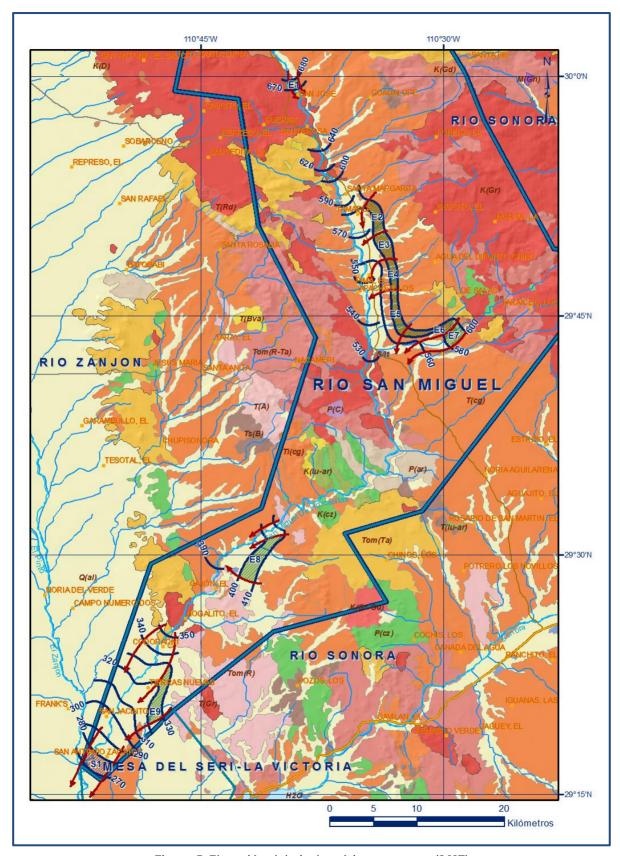


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2017)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2013-2019 registra valores de abatimiento y de recuperación. Los abatimientos varían de 5 a 10 m, que representan 0.8 a 1.7 m anuales, que se registraron en la cuenca baja, entre Tierras Nuevas y San Antonio Zacatón. Las recuperaciones varían de 1 a 5 m, que representan 0.2 a 0.8 m anuales, y se registraron en el área aledaña a San Miguel de Horcasitas y en a porción central, desde Opodepe hasta Rayón (figura 6).

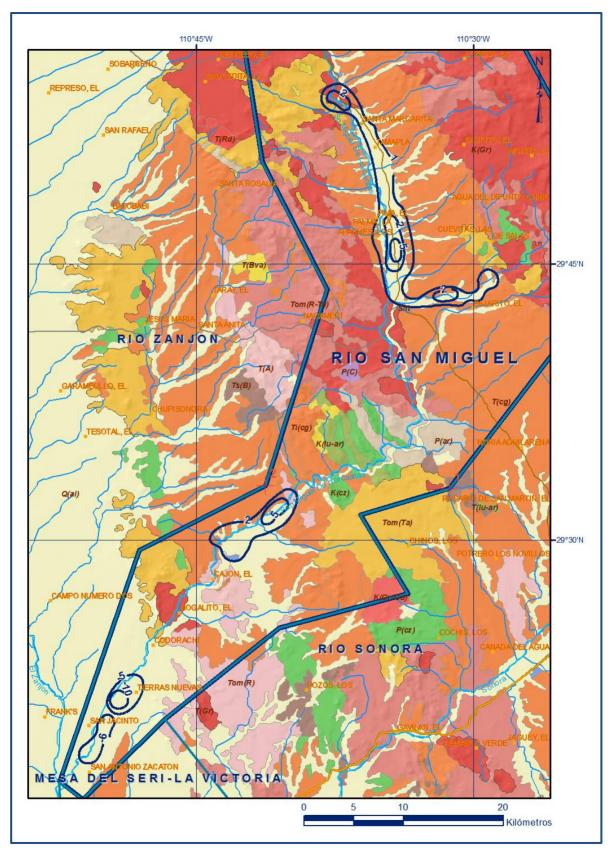


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2013-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en los años 2005 y 2008, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos a lo largo de la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las incluyeron parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones mayores y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presentó valores que variaron de 186 a 887 mg/l, los cuales se incrementan de sur a norte, a lo largo del cauce del Río San Miguel. Los valores más altos se registraron en la porción suroccidental del acuífero, confirmando la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur.

Según la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995) el agua varía de dulce a marina, existiendo al menos 60 m de espesor promedio de está, ya que los valores oscilan entre 290 y $1370\mu\text{S/cm}$. Los valores de temperatura varían de 12.9 a 30.5 °C y los de pH entre 7.1 y 7.8.

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), e las muestras analizadas se clasifican como C_1 - S_1 y C_2 - S_1 , que representan agua de salinidad baja a media 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 relación a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, la familia de agua predominante es la bicarbonatada cálcica, que representa agua meteórica de reciente infiltración con tiempos cortos de residencia. En menor proporción se presentan las familias bicarbonatada-sódica y sulfatada-cálcica-sódica.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2008, complementada con información 2022 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 938 aprovechamientos del agua subterránea, todos activos; 252 pozos y 686 norias. Del total de obras,313 se utilizan para la agricultura, 191 para abastecimiento de agua potable a los centros de población,427 para uso doméstico-abrevadero, 5 para uso industrial, 1 para uso múltiple y 1 para servicios.

El volumen total de extracción calculado es de **57.0 hm³/año**, de los cuales 48.1 hm³(84.4 %) son para uso agrícola, 7.1 hm³(12.5%) para uso público-urbano, 1.0 hm³(1.7%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-pecuario, 0.4 hm³ (0.7%) para uso industrial y 0.4 hm³(0.7%) para uso múltiple.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2013-2019, en una superficie de **394 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = 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:

Recarga total - Descarga total = 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).

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). Para este caso, debido a que el volumen destinado al uso público-urbano es pequeño comparado con el volumen para uso agrícola, para fines del balance de aguas subterráneas solo se considera la recarga incidental debida a los retornos del riego agrícola (Rr).

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 (Δ VS) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

Eh + Rv + Ri- B - Sh - ETR=
$$\pm \Delta V(S)$$
 (1)

Donde:

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Rv: Recarga vertical
Ri: Recarga incidental

B:Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR: Evapotranspiración

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

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

$$Rv = B + Sh + ETR - Eh - Ri \pm \Delta V(S)(2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su

origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

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:

$$Q = T * B * i$$

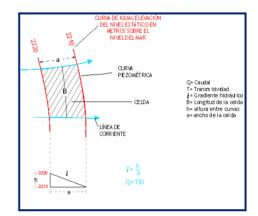
Donde:

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 duce es de **35.6** hm³/año.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
E1	1200	1000	10	0.0100	0.0100	0.1200	3.8
E2	4080	1400	20	0.0143	0.0015	0.0874	2.8
E3	3200	1570	20	0.0127	0.0015	0.0611	1.9
E4	3650	800	20	0.0250	0.0015	0.1369	4.3
E5	5000	1000	20	0.0200	0.0015	0.1500	4.7
E6	5280	880	20	0.0227	0.0015	0.1800	5.7
E7	1500	2400	20	0.0083	0.0080	0.1000	3.2
E8	6000	1950	10	0.0051	0.0050	0.1538	4.9
E9	5700	2100	10	0.0048	0.0050	0.1357	4.3
						TOTAL	35.6

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

7.1.3. Recarga incidental(Rr)

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 20% 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 entre 3 y 15 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media y baja en el subsuelo. De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 48.1 hm³ anuales y que un 20% de éste recarga de manera efectiva al acuífero, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 9.6 hm³ anuales. Por lo tanto, **Rr = 9.6 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B), por flujo subterráneo horizontal (Sh) y por evapotranspiración real (ETR) en la zona de niveles freáticos someros.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **57.0 hm³ anuales.**

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **1.4 hm³/año**.

				3		,	,
CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m²/s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
S1	2000	2300	10	0.0043	0.0050	0.0435	1.4
						TOTAL	1.4

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo subterráneo horizontal (2019)

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

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

Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 5 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 21.4 °C y precipitación = 520 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 506.5 mm.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

$$T (°C) = 21.4$$

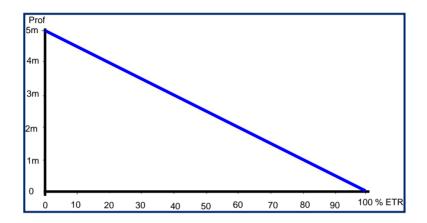
$$P(mm) = 520 \quad P^2 = 270400$$

$$L = 1325.0172 \quad L^2 = 1755670.58$$

$$ETR (mm) \qquad 506.5$$

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 metros, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 metros, se calcula el valor

de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el porcentaje de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porciento de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20 %, a 2 m el 60 % etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR** =5.7hm³/año.

RANGOS DE VOLUMEN ETR PROFUNDIDAD LÁMINA ÁREA (km²) % ETR MEDIA (m) ETR (m) (hm³/año) PROFUNDIDAD (m) 2 1.7 0.0293 0.6 0.0 2 a 4 3 5.1 0.0293 0.4 0.1 3 3 18.8 0.0293 0.4 0.2 4 3.7 0.0293 4 0.2 0.0 **Total** 29.3 0.3

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración real 2019

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2013-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico

Sy = 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 2,506 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 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de $7.4 \, \text{hm}^3$, es decir, un promedio anual de $1.2 \, \text{hm}^3$. Por lo tanto, $\Delta V(S) = 1.2 \, \text{hm}^3$ anuales.

Evolución Evolución ΔV(S) Área (km²) Sy (m) media (m) (hm³/año) -2.2 -10 -10.0 2.2 0.1 -5 a -10 -7.5 0.1 -4.8 6.4 0.1 -4.1 -6 -6 6.9 1 a 2 1.5 45.2 0.1 6.8 2 2 4.4 0.1 0.9 8.2 2 a 5 3.5 23.5 0.1 5 5.2 0.1 2.6 **TOTAL TOTAL** 93.8 7.4 Promedio anual 1.2

Tabla 4. Cálculo de cambio de almacenamiento (2013-2019)

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:

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

Rv = 57.0 + 1.4 + 5.7 - 35.6 - 9.6 + 1.2
Rv = 20.1 hm³ anuales

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

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:

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 **65.3 hm³/año**, de los cuales 55.6 hm³ son recarga natural y 9.7 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 Río San Miguel, su valor es 1.4 hm3 anuales, que corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero Mesa del Seri-La Victoria. Por lo tanto, **DNC = 1.4 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 (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 **65,803,141** m³ anuales, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) 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.

DMA = R - DNC - VEAS MA = 65.3 - 1.4 - 65.803141 DMA = - 1.903141 hm³/año

El resultado indica que no existe un volumen anual disponible para otorgar nuevas concesiones, su déficit es de **1,903,141 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora. 2005. Estudio Geohidrológico de las subcuencas de los ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri – La Victoria y Cuenca Bacoachito. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora. 2006. Estudio de piezometría y evolución de niveles, en la cuenca media y alta del río Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, 1990. Determinación del potencial de explotación del acuífero de "La Victoria" como fuente de abastecimiento a la Ciudad de Hermosillo, Sonora. Realizado GYMSA Estudios de Planeación Regional S.A de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del estado de Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Información piezométrica e hidrométrica de acuífero Río San Miguel, Sonora.

Exploraciones Global, S.A de C.V., 2008. Estudio de evaluación hidrogeológica para el proyecto minero "El Crestón", municipio de Rayón, estado de Sonora. Primera etapa: factibilidad hidrogeológica. Realizado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V. (IDEAS).

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1986. Actualización del estudio geohidrológico porción central cuenca del Río Sonora confluencia de los ríos Sonora, San Miguel y Zanjón. Realizado por la Residencia de Geohidrología y Zonas Áridas de la Delegación Estatal en Sonora de la SARH.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera "Hermosillo" H12-8, escala 1:250000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera "Opodepe" H12-D12, escala 1:50000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera "Saracachi" H12-B72, escala1:50000.