



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO ZANJÓN (2626), 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	13
4.2. Geología estructural	18
4.3. Geología del subsuelo	19
5. HIDROGEOLOGÍA	20
5.1. Tipo de acuífero	20
5.2. Parámetros hidráulicos	21
5.3. Piezometría	21
5.4. Comportamiento hidráulico	21
5.4.1. Profundidad al nivel estático	21
5.4.2. Elevación del nivel estático	24
5.4.3. Evolución del nivel estático	26
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	28
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	28
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	28
7.1. Entradas	29
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	29
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	30
7.1.3. Recarga incidental (Rr)	31
7.2. Salidas	32
7.2.1. Bombeo (B)	32
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	32
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	32
8. DISPONIBILIDAD	34
8.1. Recarga total media anual (R)	34
8.2. Descarga natural comprometida (DNC)	34
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	35
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	35
9. BIBLIOGRAFÍA	36

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 Zanjón, definido con la clave 2626 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro occidental del estado de Sonora, entre los paralelos 28°11'32" y 30°22'07" de latitud norte y 110°37'56" y 111°23'40" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,461 km².

Limita al norte con el acuífero La Tinaja; al noreste, este y sureste con Río San Miguel; al sur con Mesa del Seri-La Victoria; y al sur y oeste con Costa de Hermosillo, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1). Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende la mayor parte de los municipios de San Miguel de Horcasitas,

Carbó y Opodepe, así como porciones menores de Hermosillo, Rayón, Benjamín Hill, Santa Ana y Cucurpe.

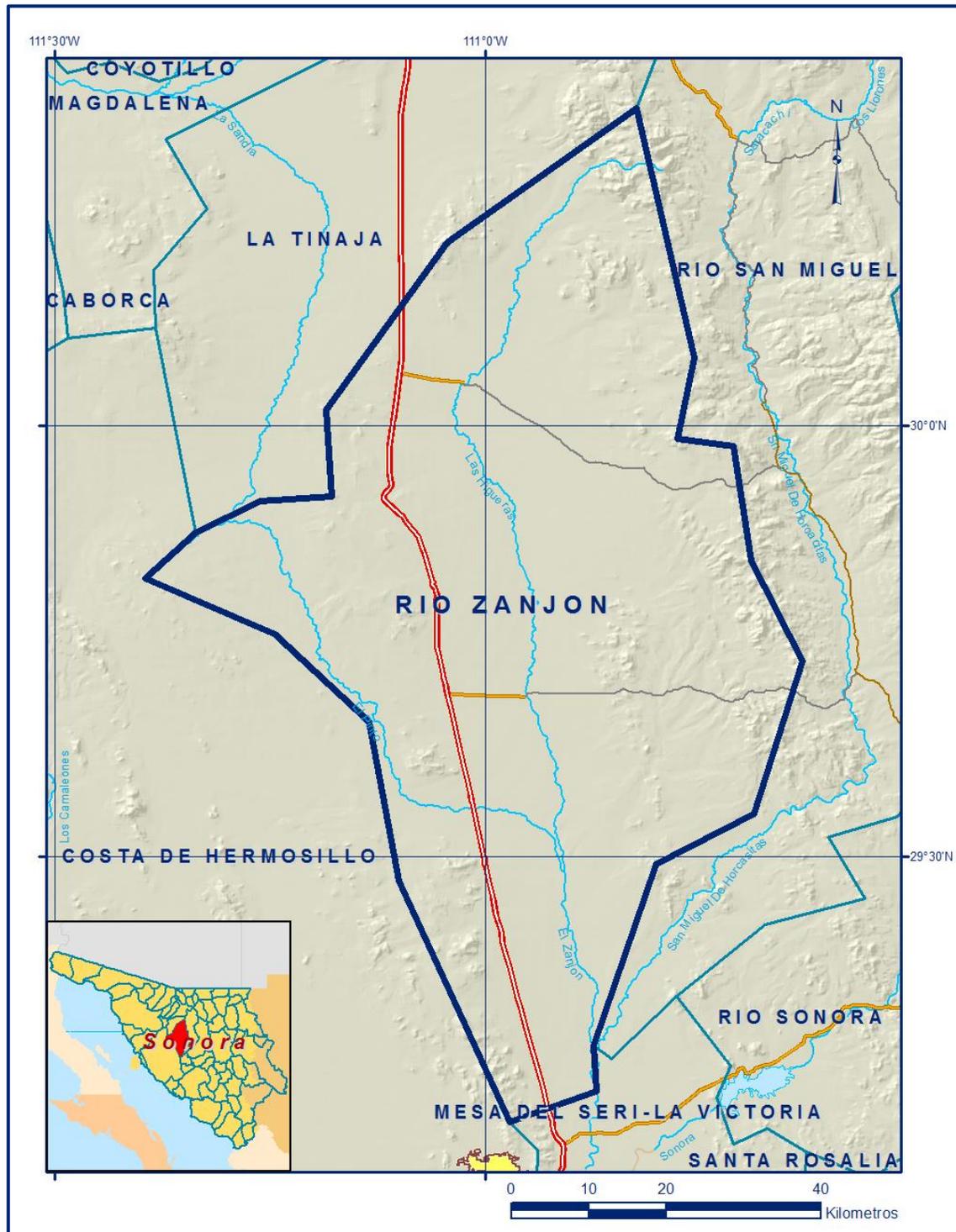


Figura 1. Localización del acuífero

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 2626 RIO ZANJON						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	52	26.8	29	16	51.0
2	110	52	17.1	29	13	40.0
3	110	58	18.0	29	11	31.5
4	111	5	59.4	29	28	18.8
5	111	8	3.7	29	39	22.3
6	111	14	39.5	29	45	28.8
7	111	23	38.8	29	49	22.8
8	111	20	11.2	29	52	34.2
9	111	15	40.4	29	54	45.0
10	111	10	41.5	29	55	3.6
11	111	11	5.8	30	1	5.9
12	111	2	37.8	30	12	46.2
13	110	49	28.3	30	22	6.9
14	110	45	27.8	30	4	44.0
15	110	46	38.2	29	59	6.1
16	110	42	42.5	29	58	35.4
17	110	41	27.8	29	50	35.9
18	110	37	56.3	29	43	38.5
19	110	41	16.5	29	32	57.5
20	110	48	7.1	29	29	26.3
1	110	52	26.8	29	16	51.0

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. En la mayor parte de él, que comprende las zonas norte, sur, centro y oriente, rige “*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. La región noroccidental está vedada por 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 dicha zona*” conocido como Meridiano 110, 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.

Por último, en los extremos suroccidental y occidental está vigente el “Decreto por el que se amplía el Distrito Nacional de Riego de la Costa de Hermosillo, Estado de Sonora” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de marzo de 1963. Esta veda es tipo I en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

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 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 Zanjón, 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 las que establece las normas mexicanas para el agua destinada al consumo humano.

INFORME DE EXPLORACIONES GEOFÍSICAS EN EL ÁREA “LA VICTORIA”, “MESA DEL SERI” Y “SAN PEDRO EL SAUCITO”, MUNICIPIO DE HERMOSILLO, ESTADO DE SONORA, realizado en 1986 por el Ing. Elías Vázquez Osorio para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El objetivo del estudio fue investigar las propiedades de los materiales del subsuelo a profundidades mayores de 300 m,

mediante la utilización de los sondeos eléctricos verticales para identificar sitios adecuados para la perforación de pozos que aportaran agua para el abastecimiento de la ciudad de Hermosillo.

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE “LA VICTORIA” COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, realizado en 1990 por 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.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL RÍO ZANJÓN, MUNICIPIOS DE CARBÓ, SAN MIGUEL DE HORCASITAS Y HERMOSILLO, realizado en el año 2000 por Geofísica de Exploraciones, S.A. de C.V. para el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero del Zanjón, A.C. El objetivo de este estudio fue actualizar la condición geohidrológica del acuífero y construir un modelo de simulación hidrodinámica para analizar el comportamiento de los niveles del agua subterránea en la porción sur del acuífero debido a la extracción de un volumen adicional para uso agrícola. Aporta información de la interpretación de pruebas de bombeo.

EJECUCIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO EN EL ACUÍFERO DEL “RÍO ZANJÓN”, SONORA. Realizado en 2001 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue realizar 6 pruebas de bombeo de larga duración, en pozos exploratorios perforados al sur del acuífero, 5 de ellas en pozos individuales y una con la operación conjunta de los 5 pozos, contando además con piezómetros construidos en la proximidad de los pozos para la medición de los niveles dinámicos. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos y

numérico permitieron la obtención de los parámetros hidráulicos en esta porción del acuífero.

SERVICIOS ESPECIALIZADOS EN MATERIA DE MEDICIÓN DE VARIABLES RELATIVAS A PROCESOS HIDROLÓGICOS SUBTERRÁNEOS, CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN, MODELACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS Y MONITOREO DE RECURSOS HIDRÁULICOS SUBTERRÁNEOS, EN EL ACUÍFERO DEL RÍO ZANJÓN, ESTADO DE SONORA. Realizado en 2002 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para la Comisión Nacional del Agua. Representa la continuación del estudio y trabajos realizados en 2001. Con la información generada en el estudio anterior se construyó un modelo de flujo subterráneo en la porción sur del acuífero, con el propósito de determinar el efecto que tendría en los niveles del agua subterránea la extracción de 4.5 hm³ adicionales, mediante diferentes escenarios de extracción. Concluye que los abatimientos generados en la zona varían de 2.5 a 3.0 m/año.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DE ACUÍFERO RÍO ZANJÓN, 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), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Desierto o Llanura Sonorense, Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses. Una pequeña área de su extremo nororiental pertenece a la Provincia Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Valles del Norte.

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

En la porción norte dominan los climas BSoh(x') árido, semicálido 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.

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 8 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Pesqueira, Hermosillo II, Carbó, Félix Gómez, Querobabi, Rayón, El Cajón y Cucurpe; con registro 1981-2015. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son **22.0 °C, 345 mm y 2280 mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero Costa de Hermosillo se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 9 “Sonora Sur”, cuenca del Río Sonora, subcuencas Río Zanjón y 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 Zanjón nace en el flanco occidental de la Sierra de Cucurpe, a una altitud de 1,150 msnm, tiene una dirección preferencial de escurrimiento norte-sur y una cuenca de captación de 4350 km². Su desarrollo lo efectúa en el extremo occidental de la Sierra de Cucurpe, a una altitud de 1,150 msnm; esta zona está limitada en este extremo por las Sierras de Caracahui, Méndez y la Cobriza, constituidas por rocas ácidas intrusivas. El río San Miguel de Horcasitas nace al norte de la comunidad de Cucurpe, presenta una orientación N-S hasta las cercanías de Rayón, donde cambia al suroeste hasta la ciudad de Hermosillo; el afluente más importante es el río Zanjón captado por la margen derecha.

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 geoformas indentificadas 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 los conglomerados de la Formación Báucarit. En la parte baja de las sierras Caracahui, Méndez y la Cobriza, localizadas en la margen derecha del río Zanjón y representando un bajo tectónico del bloque constituido por las sierras, se encuentra expuesta una terraza erosional que se extiende desde Querobabi hasta Hermosillo, compuesta por materiales de diferente granulometría que han sido acarreados y depositados por la gran cantidad de arroyos que descienden de dichas sierras. En la margen izquierda la morfología es la misma, pero las terrazas están conformadas por conglomerados.

De manera general, la cuenca del Río Zanjón presenta características topográficas simétricas en ambos márgenes hasta antes de su confluencia con el Río San Miguel, a la altura del Ejido Zamora.

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 anfíbolitas) 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 (figura 2).

En la Sierra de Mazatán ha sido fechado en $1,475 \pm 29$ 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 centro-sureste.

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. Por su importancia destaca una tercera zona de remanentes paleozoicos localizados en la porción oriental de la carta, en las sierras de Aconchi, Mazatán y La Cañada. Las edades de estas rocas varían desde el Cámbrico hasta el Pérmico.

Las rocas volcánicas de composición intermedia a félsica, de edad Cretácico Superior-Paleoceno, consisten de coladas de andesitas, aglomerado y toba andesítica, coladas riolíticas y ocasionalmente arenisca y caliza. La riolita se caracteriza por su textura porfídica en la que sobresalen ojos de cuarzo. La propilitización es más evidente en las rocas andesíticas. Los principales afloramientos se localizan en la porción central de la zona. La relación con las rocas más antiguas es discordante, y por falla normal y discordante con las rocas volcánicas del Terciario. Se correlacionan con las rocas vulcano sedimentarias de la Formación Tarahumara mejor estudiadas en la porción centro-oriental de Sonora.

Afectando a las unidades más antiguas se presentan escasos afloramientos de pórfido cuarzomonzonítico de edad Eoceno expuestos como apófisis de un posible cuerpo más profundo de mayores dimensiones, asociado a mineralización de oro con polimetálicos. Se correlacionan con las facies porfídicas de Edad Eoceno asociadas a

las intrusiones laramídicas en Sonora. El vulcanismo cuya composición varía de intermedia a ácida, de edad oligoceno, que caracteriza a las rocas de la Sierra Madre Occidental, se encuentra expuesto en las porciones centro y oriental. La parte basal la constituye la unidad conformada por derrames de lavas andesíticas con escasos horizontes de dacita, que afloran al este del cerro Chupisonora, en el cerro Los Columpios y al sur de la Mesa de Muñoz; se le asigna edad Oligoceno por su posición estratigráfica que cubre discordantemente a las rocas riolíticas, tobas riolíticas e ignimbritas, con algunas intercalaciones de riodacita y andesita.

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. Los depósitos del Cuaternario se encuentran ampliamente distribuidos en la mayor parte de la zona, rellenando amplias planicies al pie de las elevaciones principales. El conglomerado polimíctico y arenisca se presenta débilmente consolidado y aflora de manera extensa en la porción centro-oriental y suroriental. La unidad de depósitos de grava y arena aflora extensamente en la región central; las arenas y limos rellenan extensas planicies en

ambos lados del río Zanjón. Por último, el aluvión cubre el cauce del río Zanjón y su llanura de inundación (Cartas Geológico-Mineras “Hermosillo” H12-8. Escala 1:250,000. SGM, 1999, y Carbó H12-D21, escala 1: 50,000, SGM 2012).

4.1. Estratigrafía

Las unidades litológicas que afloran están constituidas por rocas metamórficas, sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas, cuyo registro estratigráfico comprende del Proterozoico inferior al Cuaternario (figura 2). A continuación, se hace una breve descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

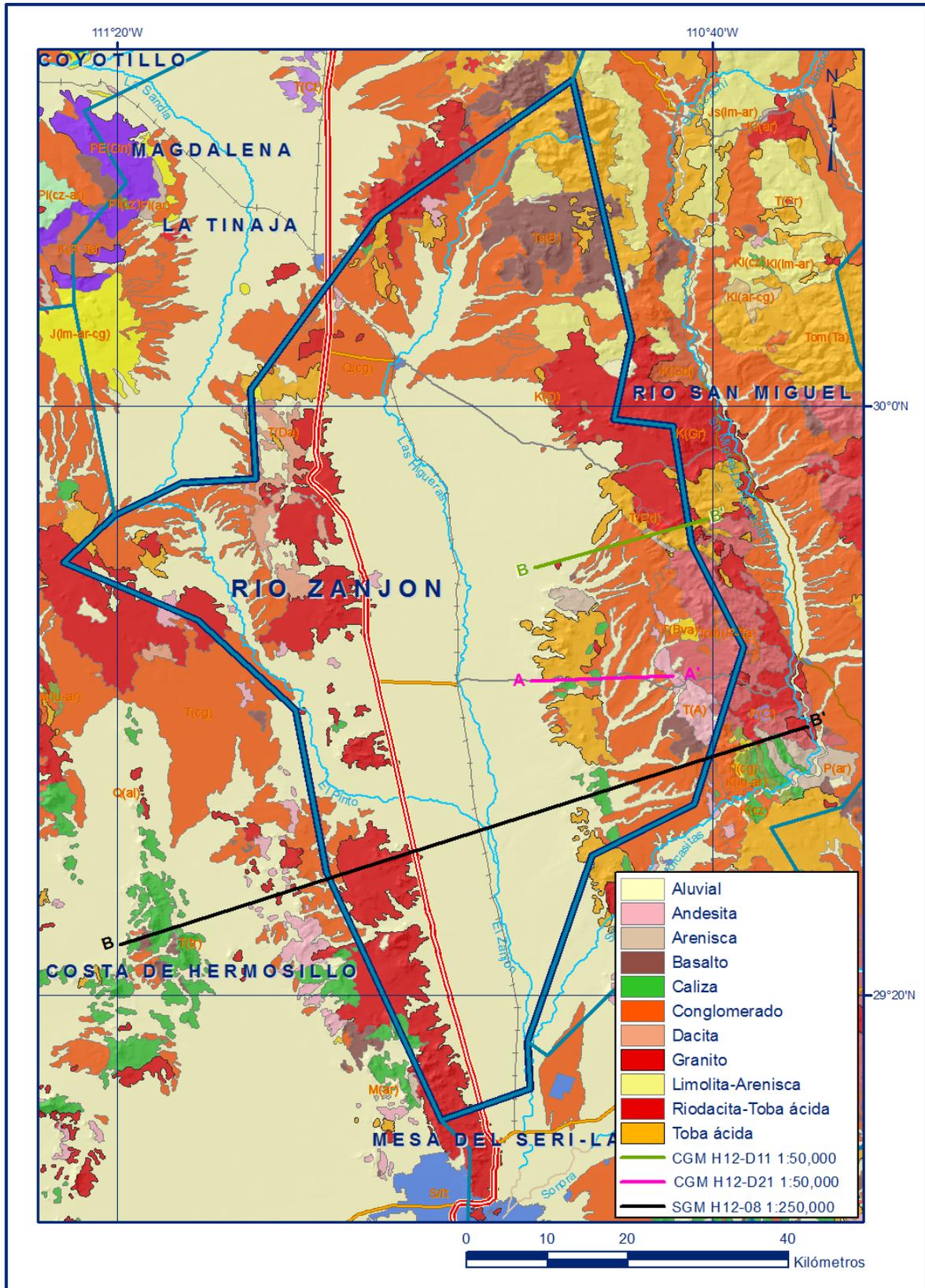


Figura 2. Geología general del acuífero

PROTEROZOICO

EL basamento Proterozoico está constituido por rocas metamórficas que incluyen metagranito, gneis, escasa filita y lentes de anfibolitas, cuyos afloramientos se presentan en la región central, son escasos y de reducidas dimensiones.

En el granito El Crestón que aflora al este de la zona, en la región de Opodepe, se determinó una edad de $1,730 \pm 9.1$ Ma en zircones, que le asignan una edad correspondiente al Proterozoico inferior. Del Proterozoico superior es la secuencia sedimentaria constituida por arenisca cuazofeldespática, arenisca de cuarzo y caliza, con alternancias de conglomerados, lodolitas y dolomía. En la zona de Carbó, las rocas están afectadas por apófisis de pórfido cuarzomonzonítico Terciario. Se correlacionan 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.

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 rocas intrusivas de composición granítica y granodiorítica de color gris claro al fresco que intemperizan a color crema, que presentan textura fanerítica equigranular que ocasiones puede ser porfídica. Mineralógicamente está compuesta por cuarzo, feldespato y micas que la clasifican como granitos de muscovita y hornblenda. 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 norte del área. En algunas localidades, como en el norte del área de estudio, 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 afánítica 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.

Secuencia de depósitos sedimentarios continentales, definida formalmente por King (1939), que en la región consta de dos miembros. El inferior está constituido por conglomerados bien consolidados y el superior por conglomerados empacados en arenas y arcillas poco consolidados. El miembro inferior corresponde a una roca consolidada y masiva, compuesta por un conglomerado polimíctico, con fragmentos subangulosos a subredondeados de diferente composición (granito, caliza, tobas), empacados en una matriz arcillo-arenosa cementada con carbonato de calcio, lo que le imprime una gran dureza.

El miembro superior está representado por roca moderadamente consolidada, compuesta por un conglomerado polimíctico, con fragmentos subangulosos a subredondeados de diferente composición (granito, caliza, tobas), empacados en una matriz arenosa, en la que es posible distinguir algunos horizontes o lentes arcillosos. Esta unidad forma depósitos de relleno en fosas tectónicas. Se considera el acuífero principal de la región, presentando una distribución caótica en sus facies y comportándose como un acuífero libre y localmente semiconfinado debido a la presencia de lentes arcillosos.

CUATERNARIO

Los depósitos cuaternarios en el área consisten de sedimentos poco consolidados a no consolidados, que cubren la mayor parte de la superficie del acuífero, rellenando amplias planicies al pie de las elevaciones principales. La unidad está integrada por un conglomerado polimíctico mal clasificado de fragmentos redondeados a subredondeados con tamaños que varían de guijarros a cantos rodados, empacados en una matriz arenosa con cementante calcáreo, que corresponde a antiguos depósitos de río, con intercalaciones de areniscas. Los depósitos de pie de monte están conformados principalmente por fragmentos de rocas ígneas intrusivas cuyo tamaño

varía desde bloques hasta arcillas. Los aluviones están conformados principalmente por arcillas y arenas. Las arcillas corresponden generalmente a las llanuras de inundación de los ríos Zanjón y San Miguel y actualmente conforman las zonas agrícolas. Las arenas son de composición muy variable y se encuentran restringidas al cauce de los ríos principalmente; su tamaño varía de fino a grueso.

4.2. Geología estructural

Los principales eventos que han afectado a la región se iniciaron en el Proterozoico Temprano con la orogenia Mazatzal que deformó y metamorizó a las secuencias de rocas preexistentes, constituyendo el basamento sobre el cual se depositó la secuencia carbonatada-clástica del Proterozoico Tardío. A finales del Proterozoico se produjo un evento regresivo que generó la depositación de una secuencia sedimentaria compuesta por ortocuarcitas, areniscas y lodolitas.

En el Paleozoico se tiene una estabilidad tectónica que permite la depositación de secuencias carbonatadas, con un lento hundimiento de la cuenca, interrumpido al inicio del Mesozoico. Durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano se desarrolla una cuenca ligada a un arco volcánico, provocando un evento de metamorfismo regional que transformó los depósitos durante el Jurásico Medio-Tardío. Anderson y Silver (1979), consideran que se desarrolló una zona de corrimiento lateral izquierdo de dirección NW-SE (Megacizalla Mojave-Sonora) que al evolucionar generó movimientos compresivos que afectaron el arco magmático dando lugar a la yuxtaposición de las rocas pre-jurásicas sobre las post-jurásicas.

Durante el Cretácico Inferior, se presenta una transgresión, y aguas provenientes del Golfo de México cubren gran parte de Sonora, generándose el depósito de rocas carbonatadas con gran contenido faunístico, en la llamada cuenca de Chihuahua-Bisbee (Bilodeau, 1983). Posteriormente, inició una regresión marina que ocasionó la depositación de sedimentos clásticos continentales representada por areniscas, lutitas, limolitas y conglomerados.

El Cretácico Medio se caracteriza por la presencia de una secuencia vulcanosedimentaria asociada a un arco volcánico continental, representada por andesitas, dacitas y riodacitas, con esporádicos lentes de areniscas y conglomerados. Durante el Cretácico Superior se inicia la Orogenia Laramide caracterizada por plegamientos y cabalgamientos de rocas sedimentarias del Precámbrico sobre rocas del Cretácico Inferior y el desarrollo de magmatismo calcoalcalino relacionado con la

convergencia entre la placa de Farallón y la placa Norteamericana, evento representado por un intrusivo granítico que forma parte del Batolito de Aconchi (Roldan, 1982). Este evento magmático fue seguido por eventos de menor magnitud que generaron apófisis y troncos de diferente composición. Durante el Terciario Medio se emplazaron rocas volcánicas félsicas en la fase final de la subducción de las placas Farallón y Norteamericana.

Este evento volcánico fue seguido por el último periodo de extensión tectónica terciaria que ocasionó la formación de fallas normales, conformando bloques levantados y escalonados, que dieron origen a la morfología de sierras y valles elongados, principalmente de rumbo NW-SE asociados al extrabasamiento de magma fisural. Anderson (1989), sugiere que algunas fallas podrían ser parte del desarrollo de “Núcleos Complejos Metamórficos”, cuyas manifestaciones de este tipo de estructuras se presentan en la Sierra de Mazatán y al oriente de Opodepe (Carta Geológico-Minera “Hermosillo” H12-8. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

Los sistemas de fallas asociados el evento distensivo de Sierras y Valles se considera como deformación frágil e inició a finales del Oligoceno cuando se generaron fosas estrechas y alargadas, limitadas por fallas normales orientadas NW-SE y N-S. En la zona de Carbó predominan los sistemas de fallas normales orientadas NW-SE, como es el caso de las fallas El Pavo, Emilia, La Plata y Chupisonora que delimitan el alto estructural o pilar La Joya, de las fosas El Zanjón y El Saucito, ubicados al oeste y este, respectivamente. En el extremo sur, las fallas El Tigre, Comederos y El Cuadro conforman un escalonamiento de bloques hacia el sur-oeste, en dirección a la fosa El Zanjón (Carta Geológico-Minera Carbó H12-D21. Escala 1:50,000. SGM, 2012).

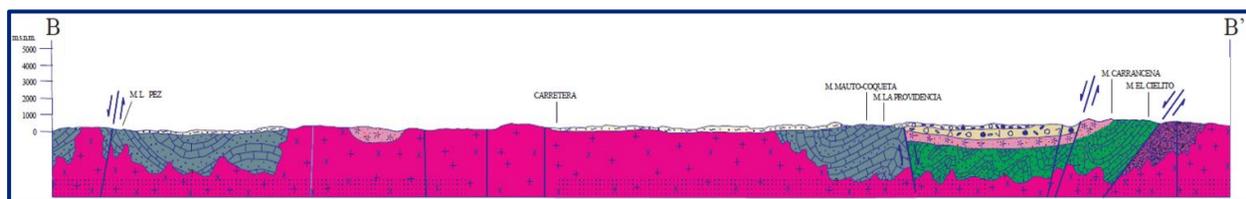
4.3. Geología del subsuelo

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.

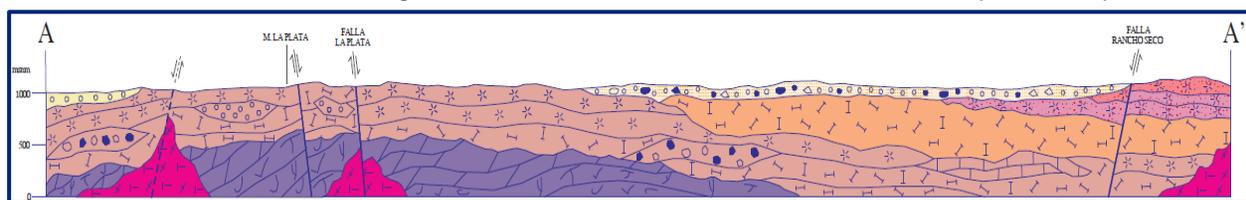
La porción superior está constituida por sedimentos fluviales, aluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos, arroyos y abanicos aluviales, cuyo espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose gradualmente hacia las inmediaciones 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

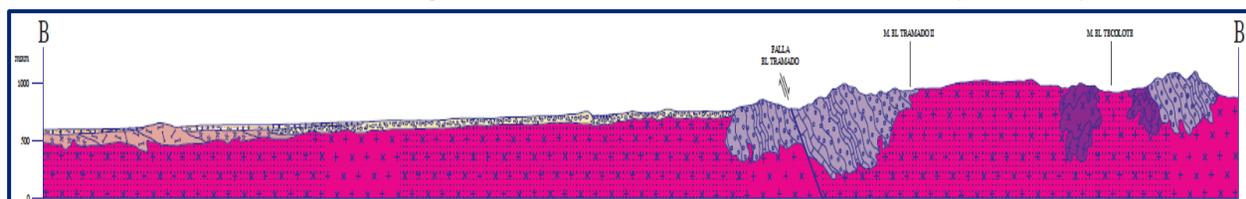
Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas ígneas, sedimentarias, extrusivas e intrusivas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración. El basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas (figura 3).



FUENTE: Carta Geológico-Minera: H12-8 "Hermosillo" Escala 1:250.000 (SGM, 1999).



FUENTE: Carta Geológico-Minera: H12-D21 "Carbó" Escala 1:50.000 (SGM, 2012)



FUENTE: Carta Geológico-Minera: H12-D11 "La Poza" Escala 1:50.000 (SGM, 2012)

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**, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos a mayor profundidad, 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 semi-consolidados que incluyen materiales clásticos y conglomerados de granulometría diversa, 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 transmitir 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).

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico de Rathod and Rushton, se determina que los valores de transmisividad varían de **3.2×10^{-4} a $2.0 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$** , dependiendo de la granulometría de los depósitos aluviales y fluviales; en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **1.03×10^{-6} a $2.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (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 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 2008-2019 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 15 a 90m, 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 15 a 40 m, se registran en la porción central del acuífero, a lo largo del cauce del río Zanjón y de algunos arroyos tributarios localizados en la región norte; en la zona de Querobabi; entre Guadalupe y Carbó en la región central; y en porción sur desde Pesqueira hasta la confluencia con el río San Miguel. A partir de estas zonas se incrementan gradualmente hacia los extremos este y oeste, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 60 a 90 m, se presentan en los flancos oriental y occidental de la región centro y norte del acuífero, desde Querobabi hasta Carbó(figura 4).

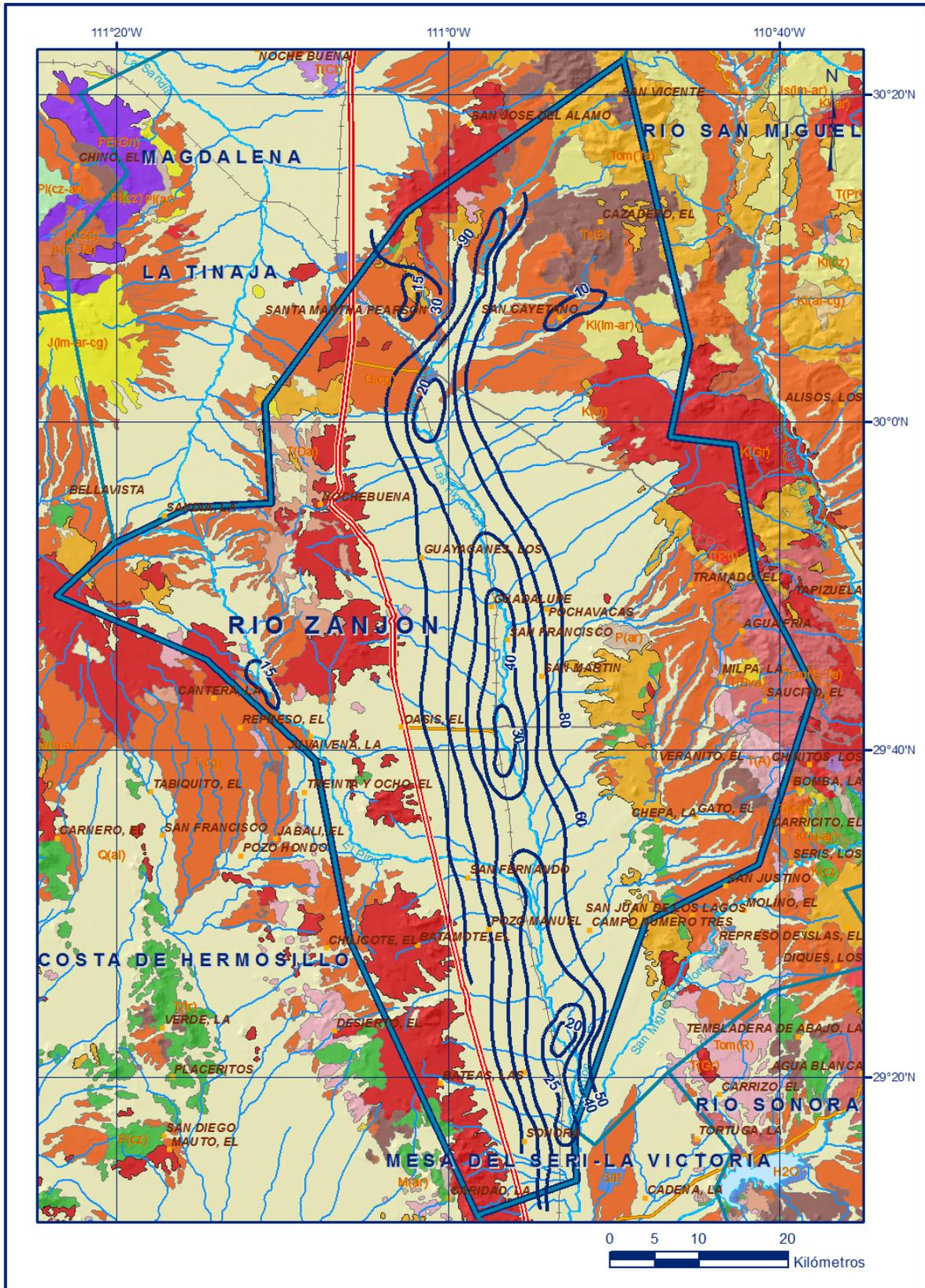


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 820 a 260 msnm, decreciendo desde la porción norte y nororiental del acuífero, en la zona San Cayetano y Querobabi, hacia la planicie aluvial localizada en la región central.

Los valores más altos, 770 a 820 msnm se presentan en la porción norte y nororiental, desde donde descienden gradualmente hacia el sur y oeste, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo N-S, paralela al escurrimiento del río Zanjón, con alimentaciones provenientes de los flanco oriental y occidental, en dirección hacia el límite con los acuíferos Río San Miguel y Mesa del Seri-La Victoria (figura 5).

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2019 registra valores de abatimiento que varían de 1 a 10 m, que representan 0.1 a 1.0 m anuales, con valores locales hasta de 8 m; que se registraron en la porción norte, entre San Cayetano y Querobabi, en el área de Los Guayacanes y en la región sur entre Carbó y Zamora (figura 6).

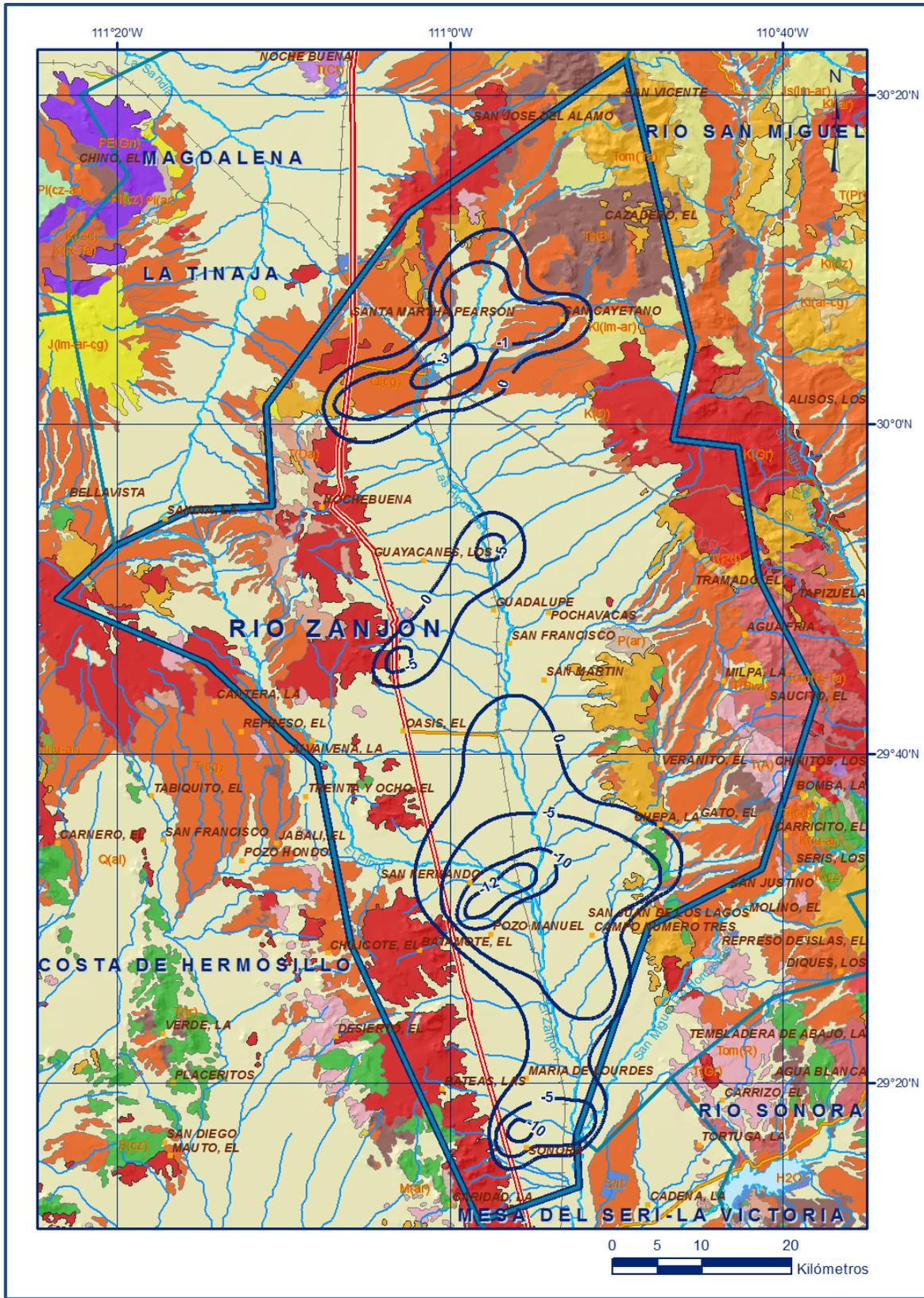


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2008-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

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 varían de 300 a 31500 mg/l. Las mayores concentraciones de STD se registran en la zona costera y las menores en la zona más cercana a la ciudad de Hermosillo, ubicada al noreste del acuífero, lo cual muestra la dirección preferencial del flujo subterráneo hacia el suroeste en dirección del mar. 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 2900 y 40800 μ S/cm.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias cálcica-bicarbonatada y sódica-bicarbonatada hacia la ciudad de Hermosillo, que representan conductos preferenciales del agua subterránea asociados al antiguo cauce del río Sonora y por lo tanto a su condición de agua de reciente infiltración. Una zona de entre 20 y 40 km de amplitud, ubicada entre El Sahuaral y bahía de Kino, en la que prevalecen dos facies de tipo sódico-clorurada y cálcica-clorurada, típicas de la franja costera influenciada por la intrusión marina.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2000, complementada con información 2022 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 703 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 413 son pozos y 190 norias. Del total de obras, 275 se utilizan para la agricultura, 109 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 133 para uso doméstico-abrevadero y 186 para usos múltiples.

El volumen total de extracción calculado es de **116.8 hm³/año**, de los cuales 114.2 hm³ (97.8 %) son para uso agrícola, 1.2 hm³ (1.0%) para uso público-urbano y 1.4 hm³ (1.2%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2008-2019, en una superficie de **2,506 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:

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

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:

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

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, 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 ($\Delta V(S)$) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

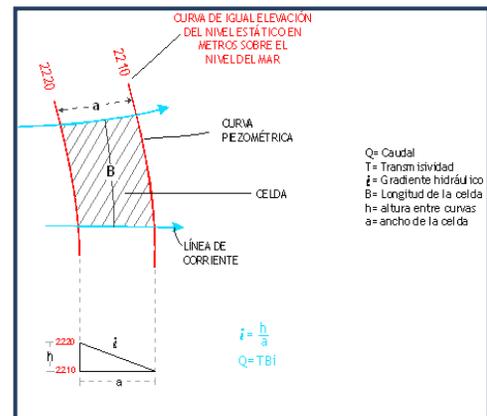
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 (m^3/s)
- T:** Transmisividad (m^2/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 **46.2 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 (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	7938	1546	50	0.0323	0.0003	0.0770	2.4
E2	4260	1363	50	0.0367	0.0005	0.0781	2.5
E3	12157	2989	20	0.0067	0.0005	0.0407	1.3
E4	9073	1767	30	0.0170	0.0002	0.0308	1.0
E5	7096	1815	30	0.0165	0.0010	0.1173	3.7
E6	3962	1496	20	0.0134	0.0015	0.0795	2.5
E7	8600	1930	50	0.0259	0.0010	0.2228	7.0
E8	11300	1900	50	0.0263	0.0003	0.0892	2.8
E9	6020	1251	10	0.0080	0.0005	0.0241	0.8
E10	6122	1488	10	0.0067	0.0008	0.0329	1.0
E11	9300	2329	10	0.0043	0.0015	0.0599	1.9
E12	5415	1931	50	0.0259	0.0010	0.1402	4.4
E13	6295	2291	50	0.0218	0.0005	0.0687	2.2
E14	10604	2686	50	0.0186	0.0003	0.0592	1.9
E15	13981	1287	20	0.0155	0.0005	0.1086	3.4
E16	8646	1292	20	0.0155	0.0005	0.0669	2.1
E17	7297	1460	20	0.0137	0.0002	0.0200	0.6
E18	8698	1814	20	0.0110	0.0003	0.0288	0.9
E19	11991	1118	20	0.0179	0.0003	0.0644	2.0
E20	6417	1656	50	0.0302	0.0003	0.0581	1.8
TOTAL							46.2

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 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 entre 30 y 50 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 114.2 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 11.4 hm³ anuales. Por lo tanto, **Rr = 11.4 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B) y por flujo subterráneo horizontal (Sh).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **116.8 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.**

Tabla 3. Cálculo de las salidas 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 (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3601	1519	5	0.0033	0.0020	0.0237	0.7
S2	5187	983	5	0.0051	0.0008	0.0211	0.7
TOTAL							1.4

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 2008-2019 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 2,506km², 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 -444.9 hm^3 , es decir, un promedio anual de -40.4 hm^3 . Por lo tanto, **ΔV(S) = -40.4 hm³ anuales.**

Tabla 4. Cálculo de cambio de almacenamiento (2008-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-12	-12	18.6	0.1	-22.3
-10 a -12	-11	31.5	0.1	-34.7
-10	-10	4.2	0.1	-4.2
-5 a -10	-7.5	305.6	0.1	-229.2
-5	-5	11.9	0.1	-6.0
-1 a -3	-2	133.5	0.1	-26.7
0 a -5	-2.5	442.2	0.1	-110.6
0 a -1	-0.5	136.5	0.1	-6.8
-3	-3	14.8	0.1	-4.4
	TOTAL	1098.8	TOTAL	-444.9
	Promedio anual			-40.4

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:

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

$$Rv = 116.8 + 1.4 - 46.2 - 11.4 - 40.4$$

$$Rv = 20.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_r \\ R &= 20.2 + 46.2 + 11.4 \\ R &= 77.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **77.8 hm³/año**, de los cuales 66.4 hm³ son recarga natural y 11.4 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 Zanjón, 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 (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 **100,556,591 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 77.8 - 1.4 - 100.556591 \\ \text{DMA} &= - 24.156591 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su **déficit** es de **24,156,591 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

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, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Zanjón, estado de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, 2001. Ejecución de pruebas de bombeo en el acuífero del “Río Zanjón”, Sonora. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Comisión Nacional del Agua, 2002. Servicios especializados en materia de medición de variables relativas a procesos hidrológicos subterráneos, calibración de equipos de medición, modelación de flujo en acuíferos y monitoreo de recursos hidráulicos subterráneos, en el acuífero del río zanjón, estado de sonora. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

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

Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero del Zanjón, A.C., 2000. Estudio de actualización geohidrológica del acuífero del valle del Río Zanjón, municipios de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo. Realizado por Geofísica de Exploraciones, S.A. de C.V.

Secretaría de 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.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH), 1986. Informe de exploraciones geofísicas en el área La Victoria”, “Mesa Del Seri” y “San Pedro El Saucito”, Municipio de Hermosillo, estado de Sonora. Realizado Ing. Elías Vázquez Osorio.

Servicio Geológico Mexicano, 1999 Carta Geológica-Minera H12-8 Hermosillo. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 2012. Carta Geológica-Minera H12-D21 Carbó. Escala 1:50,000

Servicio Geológico Mexicano, 2012. Carta Geológica-Minera H12-D11 La Poza. Escala 1:50,000