



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO AGUA PRIETA (2629), 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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia Fisiográfica.....	5
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	8
4.2 Geología Estructural	13
4.3 Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos	15
5.3 Piezometría.....	15
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3 Evolución del nivel estático	18
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1 Entradas.....	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.1.3 Recarga inducida por riego (Ri)	23
7.2 Salidas	24
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	24
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	27
8. DISPONIBILIDAD	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	28
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Agua Prieta, definido con la clave 2629 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 31° 0' y 31° 20' de latitud norte, y 109° 25' y 109° 59' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,437 km². Limita al norte con la frontera con los Estados Unidos de América, al sur el acuífero Río Frontera, al oriente el acuífero Arroyo San Bernardino y al poniente el acuífero Río San Pedro (figura 1).

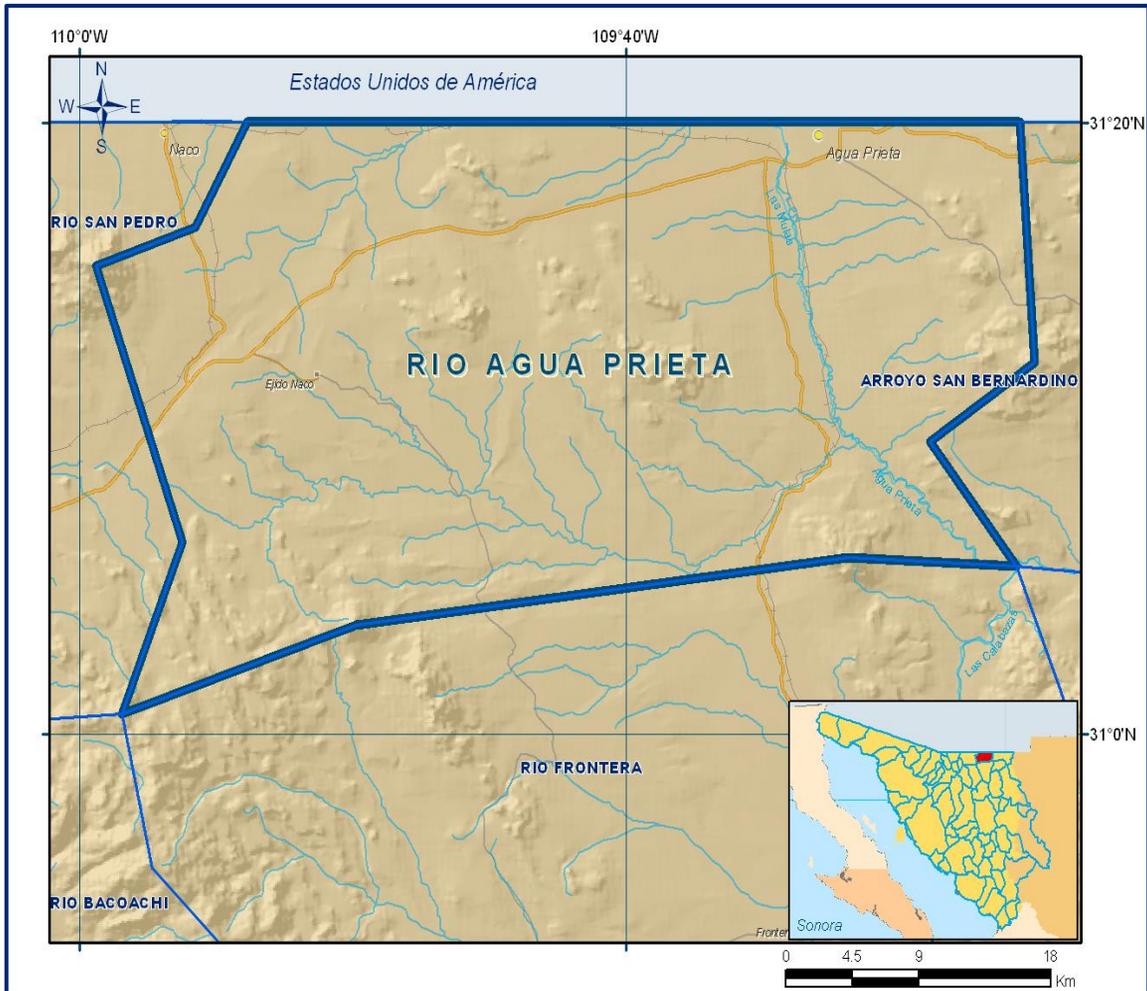


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente cubre parcialmente el territorio de los municipios Agua Prieta y Naco. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2629 RÍO AGUA PRIETA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	109	53	51.6	31	20	2.3	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
2	109	25	35.3	31	20	2.1	
3	109	25	4.3	31	12	8.6	
4	109	28	53.6	31	9	34	
5	109	25	43.9	31	5	30.1	
6	109	31	52.6	31	5	46.8	
7	109	49	53.5	31	3	34.9	
8	109	58	27.6	31	0	39.8	
9	109	56	14	31	6	17.4	
10	109	59	23	31	15	19.2	
11	109	55	44.9	31	16	35	
1	109	53	51.6	31	20	2.3	

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Río Agua Prieta pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto de veda tipo II “Diversos municipios del Estado de Sonora, entre los cuales se incluye Agua Prieta.

“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las Aguas del Subsuelo en la parte que corresponde a diversos Municipios del Estado de Sonora”, publicada en el Diario Oficial de la Federación, el 24 de septiembre de 1984.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

Los usuarios principales del agua son el sector público–urbano y el agropecuario. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la región que comprende la superficie del acuífero, se han llevado cabo algunos estudios hidrogeológicos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

INFORME DE ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR EN EL ÁREA DE NOGALES-AGUA PRIETA, EN EL ESTADO DE SONORA, realizado para extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a través de la empresa Geoexploraciones y Construcciones, S.A. en el año de 1980

En el estudio, se ejecutaron 30 Sondeos eléctricos de resistividad, de los cuales 26 se realizaron en el valle de Fronteras (perteneciente al acuífero Río Fronteras), y 4 en la zona del Río Santa Cruz. La profundidad de investigación fue de 300 a 500 m.

INFORME PRELIMINAR DE LOS SERVICIOS DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE SAN BERNARDINO EN EL ESTADO DE SONORA, el cual fue realizado por la empresa: Geólogos Consultores, S.A., efectuado en 1983 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

En el estudio se realizaron 30 Sondeos Eléctricos Verticales de resistividad para investigar a una profundidad de 300 m. De estos sondeos, 5 se llevaron a cabo en la zona del acuífero Río Fronteras; los 25 restantes se distribuyeron en las zonas de Agua Prieta, Cuquiárachic, ejido 18 de Agosto, y en la carretera a Agua Prieta–Janos.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ESTADO DE SONORA, realizado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2005. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la gerencia regional noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. Además de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de profundidad y elevación (mostrando las direcciones de flujo subterráneo). Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

ESTUDIO REGIONAL DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO AGUA PRIETA, MUNICIPIO DE AGUA PRIETA, SONORA, realizado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para la empresa RAMMADSA, de Agua Prieta, Sonora, en el 2007. Este estudio se realizó con el propósito de evaluar la recarga media anual que recibe el acuífero.

Como parte de las actividades de campo para el planteamiento y estimación de las componentes del balance de aguas subterráneas, se llevaron a cabo el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, ejecución de sondeos geofísicos y toma de muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

El territorio del Estado de Sonora queda comprendido dentro de cuatro provincias o regiones fisiográficas del país (Raisz, 1964): Llanura Sonorense, en el noroeste y oeste; Sierra Madre Occidental, en la parte oriental; Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal; y Llanura Costera del Pacífico, en el sur.

De estas cuatro provincias el acuífero Río Agua Prieta se encuentran principalmente dentro de la provincia Sierras y Llanuras del Norte, que se manifiesta con la subprovincia Llanuras y Médanos del Norte, y en menor proporción en la provincia Sierra Madre Occidental, que está presente con la subprovincia Sierras y Valles del Norte.

Subprovincia Llanuras y Médanos del Norte.

Está formada por extensos valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras; asimismo, en el límite con Chihuahua se localiza un sistema de topoformas denominado bajada. Predominan las rocas sedimentarias (principalmente conglomerados), aunque también se encuentran pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas ácidas. Surcan este territorio los ríos Punta de Agua y Cajón Bonito, afluentes del Agua Prieta. En esta subprovincia se encuentran las siguientes formas fisiográficas dentro del acuífero: Sierra Plegada y el Valle Aluvial Intermontano.

Subprovincia Sierras y Valles del Norte.

Esta región está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas, en tanto que en los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario). En esta subprovincia se encuentran las siguientes formas fisiográficas: Sierra Alta y Sierra Baja.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación utilizada por Köppen, modificada por E. García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor parte del acuífero Río Agua Prieta se manifiesta un tipo de clima seco, donde el régimen de lluvias es de verano, con lluvias invernales mayores al 10.2 %, cálido, con temperatura media anual de 17.3° C. Sin embargo, hacia la porción suroeste se presenta un clima semiseco, con régimen de lluvias en verano, lluvias invernales mayores al 10.2 %, templado con verano cálido, y temperatura media anual entre 12 y 18 ° C.

Dentro del acuífero se localizan dos estaciones climatológicas en operación: Agua Prieta y Cabullona.

Sin embargo, la estación más próxima y con influencia en el área, se encuentra en la población de Naco, ubicada al poniente de Agua Prieta, Sonora.

Con base en los registros de información existente, se llevó a cabo el análisis climatológico, a partir de las estaciones climatológicas Naco y Agua Prieta, debido a que la estación climatológica Cabullona cuenta con registros incompletos, y grandes períodos de datos faltantes. Es importante mencionar que las estaciones cuentan con registros en períodos diferentes; sin embargo, una vez analizados los datos existentes en cada una de ellas, se eligió un registro de 33 años para llevar a cabo el análisis, del año 1961 a 2006, por ser éste el que cuenta con información más completa y continua para ambas estaciones. Mediante el método de los Polígonos de Thiessen, se obtuvo una temperatura media anual de 17.3° C, una precipitación media anual de 353.5 mm anuales y una lámina media anual de 2,191 mm de evaporación potencial media anual.

3.3 Hidrografía

Hidrológicamente, el acuífero Río Agua Prieta se encuentra dentro de la Región Hidrológica RH -9 "Sonora Sur", dentro de la cuenca Río Yaqui, subcuenca del Río Batevito. El acuífero es drenado de norte a sur por el Río Agua Prieta, afluente del Río Yaqui. La parte noroeste del acuífero es drenada por el arroyo El Pinto, que corre de suroeste a noreste, hacia estados Unidos. Este arroyo es una afluente del Río Agua Blanca (Whitewater) en los Estados Unidos, el cual al pasar al lado mexicano toma el nombre de Río Agua Prieta. El Río Agua Prieta nace en los Estados Unidos y escurre en dirección norte-sur hacia México, cruzando la línea divisoria internacional cerca de Agua Prieta, Sonora.

El área drenada hasta la estación hidrométrica de Douglas, Arizona, es de 2,650 km², en los Estados Unidos de América. Aguas arriba de este sitio, los escurrimientos de algunas corrientes de las montañas se derivan para riego, pero normalmente se infiltran antes de llegar a la corriente principal. La cuenca del Río Agua Prieta en el lado mexicano, tiene un área de 1,444 km² hasta su confluencia con el Río Fronteras. Finalmente, los escurrimientos del Río Agua Prieta descargan en la presa Lázaro Cárdenas (La Angostura).

3.4 Geomorfología

Orográficamente el área está representada por sierras alargadas que se ubican en los flancos oriental y occidental, orientadas en sentido general norte-sur y noroeste-sureste, respectivamente; mientras que en la porción central existe un amplio valle con una pendiente suave.

Las elevaciones del relieve terrestre de la región oscilan entre 900 y 2300 msnm. El punto más alto se ubica en el extremo noreste, en la Sierra Las Espuelas, con una elevación 2350 msnm. En la zona se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: al este la Sierra San Luis, la cual sirve de parteaguas superficial del acuífero. Al sureste la Sierra Las Espuelas, en la porción central se ubican la sierra Los Embudos y Las Minitas, mientras que al sur las sierras Pan Duro, Basomari y Pitaycachi; finalmente al noroeste se localiza la Sierra La Ceniza.

4. GEOLOGÍA

4.1 Estratigrafía

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

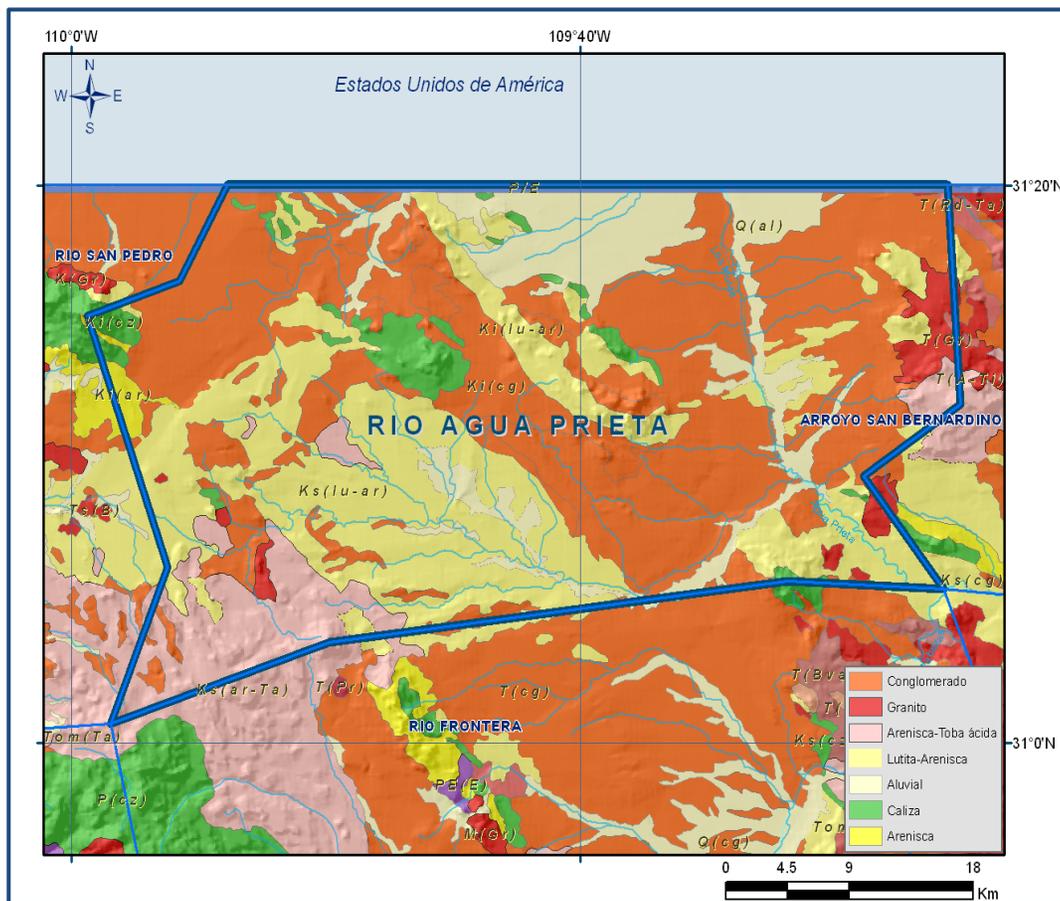


Figura 2. Geología general del acuífero

PRECÁMBRICO

La unidad está constituida por esquistos de cuarzo-sericita y micas (pTmE), correlacionables con los esquistos Pinal definidos y descritos por Ransome (1904). Su localidad tipo es colindante con el noroeste del área estudiada en el flanco occidental de las Montañas Pinal de Arizona. La unidad está datada por K-Ar (muscovita del esquisto), arrojando una edad de $1457 \text{ Ma} \pm 116 \text{ Ma}$, que contrasta con los fechamientos de 1640 Ma del sureste de Arizona. El Esquisto Pinal está intrusionado por un cuerpo granítico fechado por el Instituto Mexicano del Petróleo (1987) en la Sierra San José con una edad K-Ar de $1589 \text{ Ma} \pm 111 \text{ Ma}$, denominado Granito Mesteñas (Viveros, 1965) el cual es correlacionable con el Granito Cananea de 1440 Ma de antigüedad.

PALEOZOICO

El basamento Precámbrico (Esquistos Pinal-Granito Mesteñas) está cubierto discordantemente por una secuencia marina paleozoica, representada por rocas sedimentarias indiferenciadas que afloran en el límite suroeste y sureste del área. Esta unidad es correlacionable con las formaciones Martín, Caliza Escabrosa y Caliza Naco. Esta unidad (Pdp Cz-Ar) constituye una secuencia sedimentaria calcárea de calizas arrecifales y arcillosas, depositadas en un ambiente marino de plataforma, que afloran formando gran parte del Cerro La Negrita, donde Rangin Claude (1977) y González L.C. (1995), identifican a esta unidad cabalgando al Conglomerado Glance y a la secuencia vulcanosedimentaria cretácica del Grupo Cabullona..

MESOZOICO

El Mesozoico está constituido por rocas marinas correlacionables con el Grupo Bisbee (Ransome, F. L.; 1904), que representan a la unidad (JsKiCgp-Ar), conocida con el nombre formal de Conglomerado Glance. La unidad aflora en los flancos oriental y occidental del cerro La Negrita, y está cubierta discordantemente por las rocas que constituyen la Formación Morita. Sobreyace discordantemente a la secuencia paleozoica formada por conglomerados depositados en un ambiente continental y con clastos de tamaño y formas diversas, de redondeados a subredondeados, insertos en una matriz arenosa. Los componentes del conglomerado son derivados de esquistos, cuarcitas y calizas dispuestos en estratos que varían de gruesos a masivos.

La unidad Kap Lu-Ar es correlacionable con la Formación Morita del Grupo Bisbee, la cual aflora en las sierras San José, Anibacachi, El Caloso y Cerro Cabullona. Esta unidad está constituida por una alternancia de lutitas y areniscas que se depositaron en un ambiente marino.

Las areniscas son del tipo subgrauwaca y presentan escasos horizontes de ortocuarcitas, su tamaño del grano varía de fino a medio, redondeados y compactados, dispuestos en una matriz arcillo-calcárea; dispuesta en estratos de espesor mediano y localmente presentan estratificación cruzada. Las lutitas son calcáreas, muy deleznales y dispuestas en capas que varían de laminares a delgadas; contienen amonitas, gasterópodos y pelecípodos.

Esta unidad sobreyace concordantemente al Conglomerado Glance y subyace concordantemente a la Formación Caliza Mural, la cual está representada en la columna litológica por la unidad Kapa Cz. Esta formación aflora en la Sierra San José, Anibacachi y El Caloso, y está constituida por calizas fosilíferas depositadas en un ambiente de plataforma somera, de textura granular, con estratos que varían de medianos a gruesos.

En ocasiones presentan horizontes de coquinas. Por su contenido faunístico, que consiste de *Orbitolina Texana Roemer* (INEGI, 1982), rudistas y pelecípodos, a esta unidad le fue asignada una edad correspondiente al límite Aptiano – Albiano y se correlaciona con la Caliza Mural.

El Albiano está representado por la unidad Ka Ar-Lu, la cual es correlacionable con la Formación Cintura asignada al Albiano que aflora en la Sierra San José y El Caloso. Está constituida por una secuencia sedimentaria de areniscas de grano fino, del tipo subgrauwacas, depositadas en un ambiente marino. Se constituyen por fragmentos líticos de cuarzo y feldespatos. Los estratos varían de delgados a medianos con esporádicas intercalaciones de lutitas laminares fosilíferas muy deleznales.

El fin del Mesozoico se representa con las unidades Ks Ar-Lu, Ks (?) Cgp-TR, Ks Ar-TR, Ks (?) Cgp y Ks TR-Cgp correlacionables con el Grupo Cabullona (Talafierro, 1933), quien lo dividió en las formaciones Snake Ridge, Arenisca Camas, Lutitas Packard, Capas Rojas Superiores y Toba Riolítica. Después González L. C. (1994, 1995) las redefine nombrándolas de la base a la cima como Corral de Enmedio, Arenisca Camas, Conglomerado Cemento, Lutitas Packard y Lomas Coloradas. La unidad Ks Ar-TR es de areniscas y rocas volcánicas principalmente ácidas en la parte superior del Grupo

Cabullona. Las unidades Ks (?) Cgp-TR y Ks (?) Cgp posiblemente sean parte de las unidades denominadas por González L.C. (1994, 1995) como Conglomerado Cemento.

CENOZOICO

El Terciario está representado por la unidad Teo A-TA cartografiada en el flanco oriental de la Sierra La Ceniza.

Está constituida por una alternancia irregular de derrames y depósitos piroclásticos de composición intermedia. La coloración es oscura y abundan los fenocristales de hornblenda y plagioclasa sódica, englobados en una matriz afanítica con estructura masiva.

Estas rocas podrían tentativamente correlacionarse en edad con rocas similares a las de la Formación Tarahumara del Cretácico-Terciario. En esta localidad se les encuentra cubiertas por rocas volcánicas de composición silícea representadas por las unidades ToTR-R.

Formación Báucarit (TmCgp-B, Tm Cgp-Ar, TmCgp-ar). Secuencia de areniscas, conglomerados bien consolidados y arcillas bien estratificadas, cuya parte inferior contiene flujos de basaltos intercalados con aglomerados basálticos.

Se considera producto de una sedimentación continental principalmente de ambientes fluviales y lacustres interestratificadas con rocas volcánicas ácidas, básicas e intermedias, su origen está íntimamente ligado a la distensión terciaria. Aflora en la Sierra San Luis, en las márgenes de los ríos Los Embudos, Agua Prieta Cuchuverachi y Batevito, cerca del Rancho Los Jabalinas (ubicado al oeste de la Sierra Pitaycachi) y al sureste del Cerro La Cabullona.

Sus afloramientos descansan sobre riolitas y tobas riolíticas elevadas, al sureste del Cerro La Cabullona se encuentra rellenando las depresiones causadas por la distensión terciaria limitada por la falla La Cabullona. El espesor aproximado en algunos afloramientos alcanza los 200m. Por su alto grado de compactación y material fino, a esta unidad se le considera sello, cuya función es generar fenómenos de confinamiento y semiconfinamiento acuífero.

Secuencia Volcánica Básica (Tpa PDa). Se trata de una serie de rocas representadas por basaltos, andesitas, andesitas basálticas, así como aglomerados basálticos con ocasionales intercalaciones de tobas ácidas de naturaleza riolítica y riodacítica, donde su principal relación estratigráfica es con la secuencia volcánica ácida del Oligoceno.

Dentro de la zona su afloramiento más importante se observa en la Sierra Basamori, cubriendo discordante a rocas correlacionables con el Grupo Bisbee y la Formación Báucarit; en la misma región, al sur del Cerro Cabullona, sobreyace discordante a la Formación Morita.

Conglomerados Polimícticos del Pleistoceno (Qpt Cgp). Unidad conglomerática polimíctica mal consolidada con escasos horizontes de limos y arenas, sus clastos están por lo general bien redondeados y son producto de erosión de rocas preexistentes, se presenta formando terrazas y depósitos de talud; los cuales se distribuyen principalmente en la porción central del acuífero, en llanuras intermontanas formando lomeríos. Sus afloramientos principales forman el valle, con espesores aproximados de 50 m. Por lo general se encuentran cubriendo a la Formación Báucarit y unidades preterciarias, son cubiertos por depósitos aluviales de ríos, arroyos y planicies de inundación. Por su bajo grado de consolidación la permeabilidad asignada es alta.

Basalto (Qpt B). Basaltos de tipo toleítico alcalino, sus afloramientos son muy escasos y se presenta en forma de cuerpos de poco volumen y espesor, orientados casi norte-sur, cubriendo a un conglomerado polimíctico mal. La permeabilidad asignada a esta unidad es alta. Gravas y Arenas (Qptgv-ar). Esta unidad se encuentra constituida por sedimentos de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consiste de gravas, arenas, limos y arcillas, que en algunas ocasiones presentan estratificación débilmente marcada, aunque la mayor parte de las veces se presenta masiva.

Estos depósitos se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades preexistentes, rellenando depresiones y cuencas actuales y son considerados de edad Pleistoceno Superior. Su permeabilidad es alta.

Limos y Arenas (Qholm-ar). Unidad constituida por depósitos aluviales no consolidados de arenas y limos que se han acumulado a lo largo de los valles principales; el tipo de componentes y la granulometría de la unidad varía ampliamente en toda el área, incluye a los depósitos aluviales de grano fino de la parte central de los valles, así como los depósitos de grano grueso de las fajas de pie de monte. La planicie aluvial de la porción occidental está caracterizada por la presencia de constituyentes de grano muy fino. La permeabilidad asignada es alta.

Aluvión (Qho-al). Los depósitos superficiales cuaternarios se encuentran restringidos a los lechos de los ríos, planicies de inundación y arroyos; estos afloramientos consisten de gravas, arenas, limos y arcillas sin consolidar. El aluvión presenta permeabilidad alta.

4.2 Geología Estructural

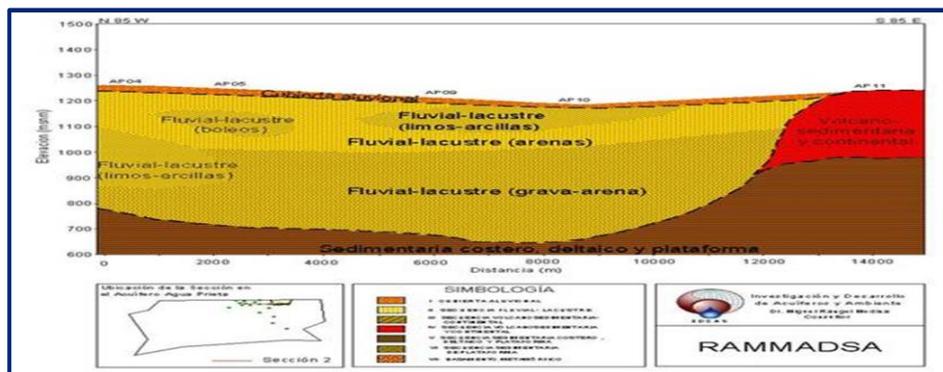
En el área se distinguen deformaciones de tipo dúctil, dúctil-frágil y frágil. La primera está representada por la esquistocidad y foliación que presenta la unidad de esquistos de cuarzo-sericita y micas (pTmE) en el sector centro y sureste del acuífero, con un rumbo en la foliación noroeste-sureste, con echados al suroeste y al noreste.

La deformación dúctil-frágil está representada por las cabalgaduras de las sierras Anibacachi y La Ceniza, donde la columna del Paleozoico y Cretácico Inferior cabalga al Grupo Cabullona, así como el anticlinal Anibacachi y el sinclinal Magallanes, que afectan tanto a las rocas cabalgantes como a las cabalgadas. Los ejes de estos pliegues presentan una dirección noroeste-sureste y este-oeste, análoga a la de las cabalgaduras. La deformación frágil se observa en las estructuras post-laramídicas como producto de una fase de extensión miocénica, que se caracteriza por fallamiento regional normal de rumbo noroeste-sureste, que generó fosas y pilares en la Sierra Anibacachi y los cerros Las Mesteñas, Cabullona y El Caloso.

Hay estructuras más recientes de rumbo norte-sur y noreste-suroeste que cortan a las anteriores, las cuales fueron detectadas en depósitos sedimentarios pleistocénicos y en rocas volcánicas terciarias, tal como la Falla Pitaycachi.

4.3 Geología del subsuelo

El acuífero que se explota actualmente (figura 3) se ubica en un medio granular no consolidado de gravas arenas y limos; por debajo de este, en el valle existe un paquete consolidado del Conglomerado Glance.



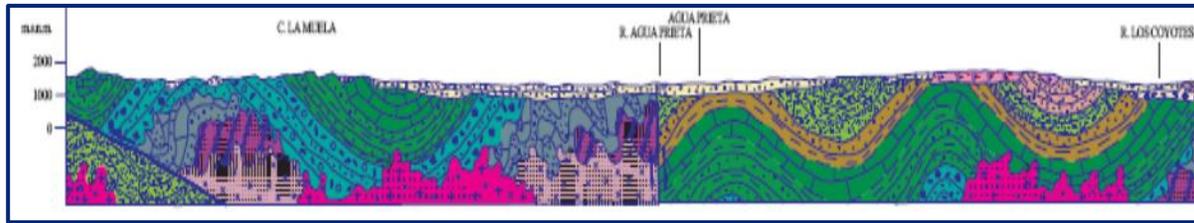


Figura 3. Sección geológica esquemática E-W

Hacia el noreste del acuífero se encuentra un paquete de toba riolítica de gran potencia por el cual circula agua subterránea.

En las sierras aledañas al valle, en la porción occidental de la zona, afloran paquetes de calizas, areniscas y lutitas de edad Cretácica, correspondientes al Grupo Cabullona; formaciones Mesa, Cintura, Morita y la Secuencia Indiferenciada; a través de las cuales el flujo subterráneo se mueve en su dirección natural hacia el valle. El basamento y las fronteras al flujo subterráneo del acuífero están constituidos por el Conglomerado Glance que subyace al conglomerado polimíctico del Cuaternario, las unidades de baja permeabilidad de la Formación Báucarit y los intrusivos laramídicos de composición granítica.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero que actualmente se explota es de tipo libre, formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por gravas, arenas y arcillas, de permeabilidad media, que se restringe a los cauces de los arroyos. Localmente se presentan condiciones de semiconfinamiento debido a la presencia de depósitos limo-arcillosos, como en las inmediaciones de la zona urbana de Agua Prieta. Se considera a las unidades I (aluvial) y II (fluvial – lacustre) como las unidades acuíferas principales. Debajo de esta secuencia y fuera de los cauces de los ríos y arroyos, el acuífero está conformado por conglomerados y una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El conglomerado polimíctico del Cuaternario presenta buenas posibilidades de explotación debido a su bajo grado de consolidación y los escasos horizontes de limos y arenas que presenta. Ambas unidades descansan sobre el Conglomerado Glance, el cual presenta baja permeabilidad.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del trabajo de campo realizados durante el año 2007, se llevaron a cabo 6 pruebas de bombeo de corta duración (5 horas como máximo en abatimiento, y 5 en recuperación) cuyos resultados de la interpretación se muestran en la tabla 5. Para su interpretación se utilizaron los métodos de Neuman y de Theis & Jacob. El primero se utilizó para los datos tomados en abatimiento y el segundo para los de recuperación.

Los mayores valores de transmisividad promedio, hasta de **$1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , corresponden a los depósitos fluviales de los ríos y arroyos. Las transmisividades medias se encuentran en zonas un tanto alejadas del cauce de arroyos (**$7.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$**), en tanto que las zonas de menor transmisividad se registran en las inmediaciones de la ciudad de Agua Prieta (**$3.48 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ a $9.34 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$**).

En cuanto a la conductividad hidráulica, sus valores más altos se presentan en las zonas aluviales de los arroyos, con un valor promedio de **$1.13 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** . Las menores conductividades se registran principalmente en los pozos de agua potable de la ciudad de Agua Prieta, que presentan como valor extremo **$5.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$** , debido a la presencia de sedimentos arcillosos.

En el área tres de las pruebas contaron con pozo de observación, sin embargo solo en una de ellas fue posible obtener resultados satisfactorios, pues en las otras dos el nivel estático tuvo una respuesta mínima, debido a la distancia entre el pozo de producción y el de observación. En esta prueba (pozo AP-57) se obtuvo un coeficiente de almacenamiento 8.52×10^{-3} , y se encuentra dentro de la zona urbana de Agua Prieta.

5.3 Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores siendo uno de ellos la medición de los niveles piezométricos, mediante los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes.

La información piezométrica en el acuífero es escasa, pues solo se tiene información confiable de los estudios realizados en los años 2005 y 2007. Éste último es más completo y se utilizó para describir el comportamiento hidráulico del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

Siendo el acuífero Río Agua Prieta un acuífero fronterizo, existe una descarga hacia Estados Unidos en la porción noroeste, en la zona que drena el arroyo El Pinto, y una recarga proveniente del mismo país en la parte norte, en las inmediaciones de la zona urbana de Agua Prieta, a través del río del mismo nombre. En la zona aluvial, el acuífero es muy sensible a la recarga por lluvia, y en las zonas donde existe un semiconfinamiento, la recarga es más lenta, debido a la baja permeabilidad y a que la profundidad al nivel estático es del orden de 100 m.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En el acuífero Río Agua Prieta las profundidades al nivel estático en general son menores a 30 m. Los valores menores se registran en el cauce de arroyos y del Río Agua Prieta. Sin embargo también existen aprovechamientos que presentan profundidades al nivel estático mayores a los 100 m, como los que se existen en la ciudad de Agua Prieta, localizada en el extremo noreste del acuífero. De acuerdo a los estudios de geofísica, las mayores profundidades al nivel estático se encuentran en zonas donde el acuífero presenta condiciones de semiconfinamiento. La menor profundidad se tiene registrada en una noria ubicada a 6 km al este de Agua Prieta, donde el nivel estático se encuentra a 2.5 m de profundidad (figura 4). Al sur del acuífero se registra la existencia de algunos manantiales.

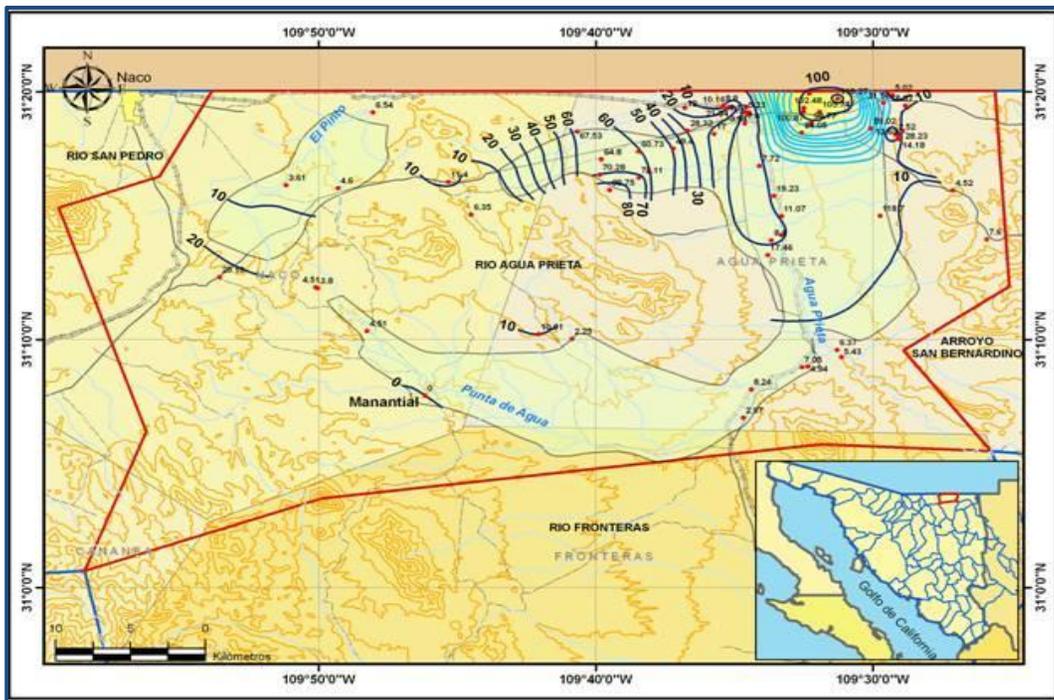


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para septiembre de 2007, el flujo subterráneo muestra dos direcciones preferenciales de acuerdo a la existencia de algunos horizontes limo-arcillosos que propician condiciones locales de semiconfinamiento. De esta manera, se forma un sistema constituido por varios horizontes de errática continuidad lateral y de variada permeabilidad, que están interconectados naturalmente a través de un flujo vertical descendente de agua y también a través de pozos que tienen grandes columnas de tubería ranurada.

En general para las zonas que presentan un comportamiento de acuífero libre, las mayores elevaciones del nivel estático se registran en áreas de mayor elevación topográfica, de manera que el flujo subterráneo se dirige de las laderas hacia el valle., con direcciones preferenciales norte - sur, este - oeste, y oeste - este, paralelas a la dirección del escurrimiento superficial (figura 5).

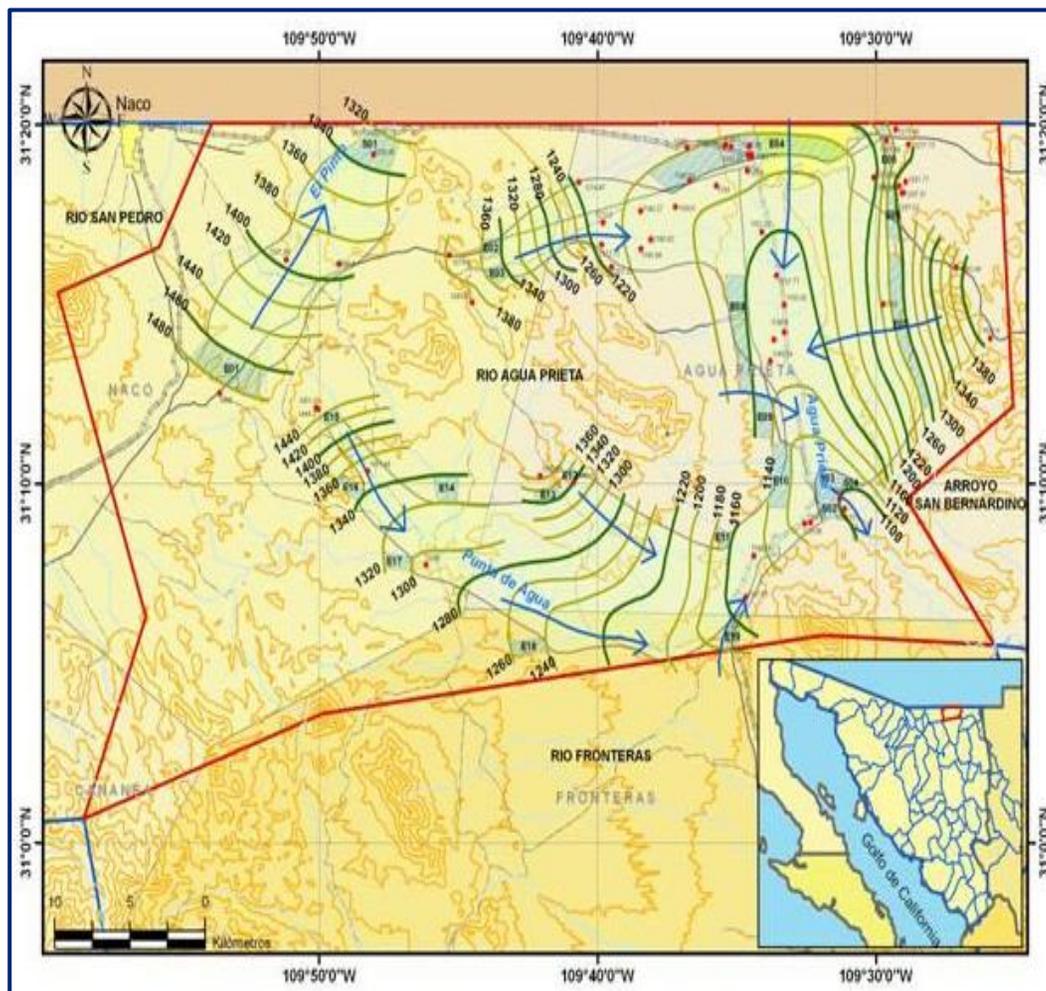


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

Para la configuración de la elevación del nivel estático y la definición de las celdas de flujo de entrada, no se consideraron las zonas de semiconfinamiento, en los alrededores de la ciudad de Agua Prieta, por ser un sistema hidrodinámico profundo que no presenta una relación directa con el resto del acuífero.

La mayor elevación del nivel estático (1488 msnm), se encuentra hacia el extremo oeste del acuífero, en el predio El Texano; y la menor se ubica en el predio El Porvenir, localizado al sureste del acuífero, y su valor es de 1100 msnm.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos, como los reportados en el Atlas de Aguas subterráneas del estado de Sonora, reflejan variaciones puntuales tanto positivas como negativas y se encuentran concentradas en una pequeña zona, por lo que no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2008, se tomaron muestras de agua en 10 aprovechamientos de aguas subterráneas para su análisis físico-químico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos. En el acuífero Río Agua Prieta, las temperaturas del agua subterránea medidas en los sitios de muestreo se encuentran entre 18.5°C y 26.5°C, el pH varía de 7.0 a 8.4 y los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 511 y 1689 $\mu\text{S/cm.}$, por lo que se clasifica como agua dulce.

Respecto a las concentraciones de sodio, éstas varían 20.4 y 195.0 mg/l; las de calcio se encuentran entre 24.7 y 131.0 mg/l, en tanto que para magnesio oscilan entre 5.4 y 40.0 mg/l y para potasio entre 2.0 y 6.6 mg/l.

En lo correspondiente a contenido de cloro en los aprovechamientos muestreados, la concentración varía entre 266 y 270 mg/l. Para sulfatos, el contenido en el agua subterránea se encuentra entre 191 y 166 mg/l; para bicarbonatos la variación en las concentraciones es de 233 a 393 mg/l y para nitratos de 0.1 a 2.7 mg/l.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis físicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 344 a 552 ppm, por lo que el agua es de excelente calidad, apta para el consumo humano y para todo uso (figura 6).

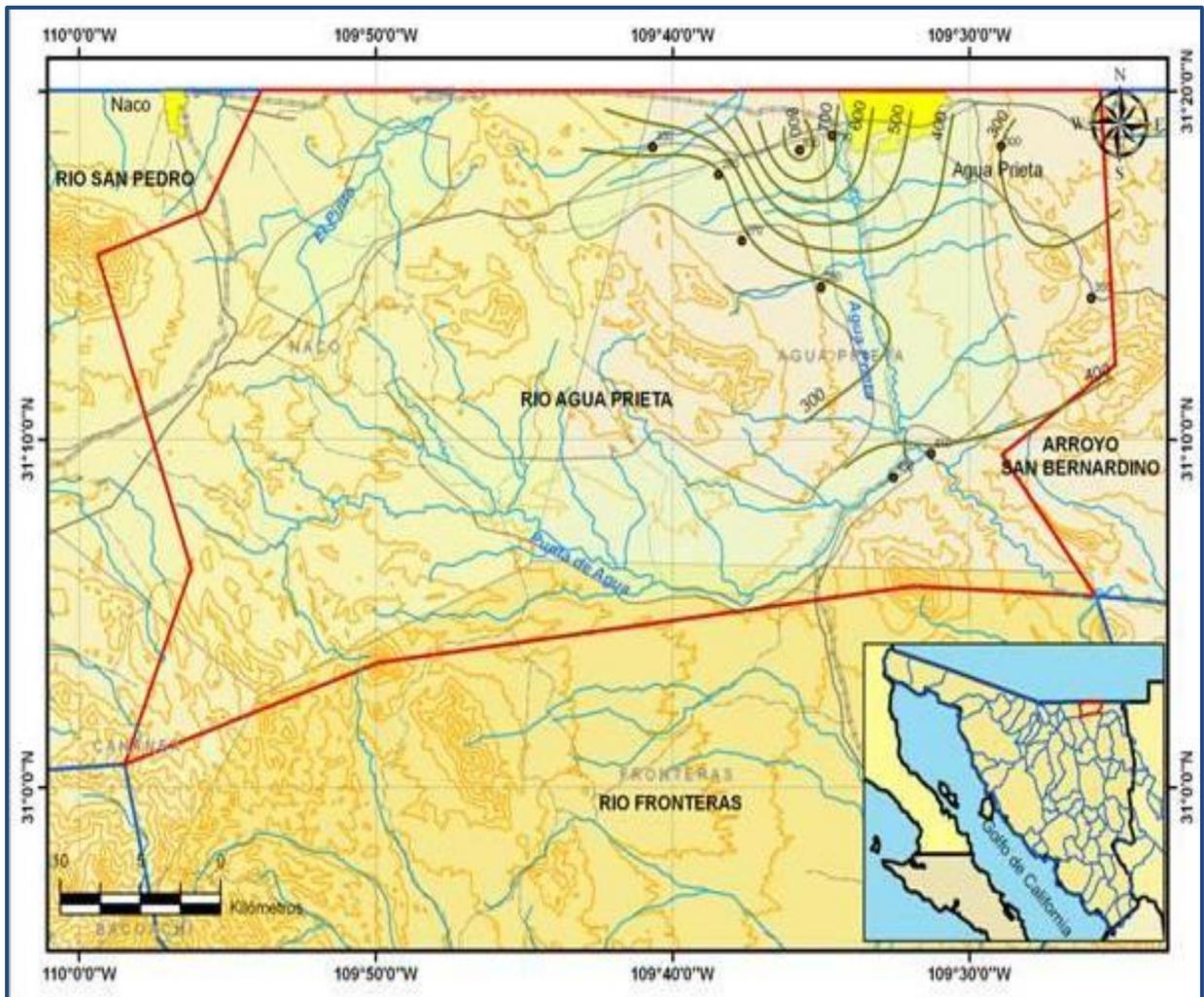


Figura 6. Concentración de Sólidos Totales Disueltos en ppm (2007)

Desde el punto de vista de la calidad del agua para uso agrícola, la mayor parte de las muestras de agua subterránea analizadas se clasifican como C1-S1, es decir aguas de baja salinidad y bajo contenido de sodio, que no imponen restricción alguna ni para el riego de los cultivos ni para los suelos de la región. En menor proporción se presentan aguas clasificadas como C2-S1.

La familia del agua predominante es bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración, con tiempos de residencia muy cortos que reflejan en bajas concentraciones de STD. Localmente, algunas muestras pertenecen a la familia bicarbonatada-sódica cuya presencia se atribuye a procesos de intercambio iónico.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo realizado en el 2008, se registró la existencia de 87 aprovechamientos de aguas subterráneas en el acuífero Río Agua Prieta, 59 pozos (64%), 27 norias (35%) y un manantial (1%), de los cuales 69 se encuentran activos y los 18 restantes inactivos.

De los 69 aprovechamientos activos, 29 (42%) se utilizan para uso pecuario, 19 para uso público urbano (28%), 12 para uso agrícola (17%), 8 para uso doméstico (12%), y 1 para uso industrial (1%). El volumen de extracción conjunto estimado asciende a **16.6 hm³ anuales**, de los cuales 13.8 hm³ (81 %) se utilizan para satisfacer las necesidades del uso público-urbano de la ciudad de Agua Prieta, 2.3 hm³ más (16 %) se destinan a las actividades agrícolas y los 0.5 hm³ restantes (3%) para uso pecuario. El volumen de agua destinado a los usos doméstico e industrial es muy pequeño.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales.

Por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, para fines del balance se considera que no se presenta la recarga por retornos agrícolas.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

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

Donde:

- R_v :** Recarga vertical
- E_h :** Entradas por flujo horizontal
- R_i :** Recarga inducida
- B :** Bombeo
- Sh :** Salidas por flujo horizontal
- ETR :** Evapotranspiración real en niveles someros
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio 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.

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado. La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

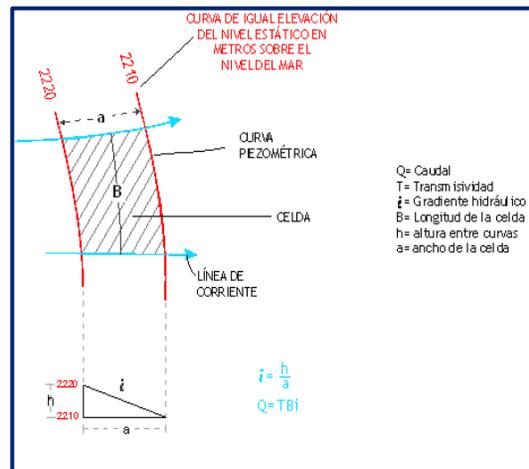
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T). Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

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

$$T = K b$$

El cálculo del flujo en las celdas de entradas se muestra en la tabla 2 (figura 5), en la que se puede observar que su valor asciende a **19.4 hm³ anuales**. Los valores de transmisividad que se utilizaron para las celdas de flujo corresponde al valor puntual obtenido en pozos cercanos a los sitios donde se realizaron las pruebas de bombeo o a su promedio aritmético ($7.87 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) cuando se encuentran más alejadas.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo horizontal (2007)

CELDA	LONGITU D B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUME N (hm ³ /año)
E1	3251	2000	20	0.0100	0.0008	0.0260	0.82
E2	673	1116	20	0.0179	0.0008	0.0096	0.30
E3	549	1127	20	0.0177	0.0009	0.0088	0.28
E4	10324	1290	20	0.0155	0.0002	0.0320	1.01
E5	3088	495	20	0.0404	0.0002	0.0250	0.79
E6	2709	700	20	0.0286	0.0007	0.0542	1.71
E7	8209	713	20	0.0281	0.0011	0.2533	7.99
E8	5940	1280	20	0.0156	0.0011	0.1021	3.22
E9	2080	1015	20	0.0197	0.0011	0.0451	1.42
E10	2787	1144	20	0.0175	0.0008	0.0390	1.23
E11	213	1041	20	0.0192	0.0008	0.0033	0.10
E12	148	665	20	0.0301	0.0008	0.0036	0.11
E13	149	1401	20	0.0143	0.0008	0.0017	0.05
E14	477	1482	20	0.0135	0.0008	0.0051	0.16
E15	145	759	20	0.0264	0.0008	0.0031	0.10
E16	101	1689	20	0.0118	0.0008	0.0010	0.03
E17	152	1639	20	0.0122	0.0008	0.0015	0.05
E18	163	3000	20	0.0067	0.0008	0.0009	0.03
E19	132	2500	20	0.0080	0.0008	0.0008	0.03
TOTAL						19.4	

7.1.3 Recarga inducida por riego (Ri)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego.

En el acuífero Río Agua Prieta, existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 249 ha. Los cultivos principales son alfalfa (50 %), forraje (40 %) y maíz (10%). El uso consuntivo promedio (\overline{UC}) se calculó como:

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

Donde A_i y UC_i son el área y el uso consuntivo del cultivo i . La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney–Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996). Si $i = 1, 2, 3$ para la alfalfa, forraje y maíz, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(124.71 \text{ ha} \times 1008 \text{ mm}) + (99.77 \text{ ha} \times 1250 \text{ mm}) + (24.94 \text{ ha} \times 700 \text{ mm})}{249.42 \text{ ha}} = 1074 \text{ mm}$$

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

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

En donde P es la precipitación media anual y L_r es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente de la extracción para uso agrícola ($2.3 \text{ hm}^3/\text{año}$) y la superficie regada (249 ha), arrojando un valor de 910.51 mm. Así,

$$Rr = 353.5 + 922.1 - 1074 = 201.6 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el valor de la lámina de retornos de riego aplicada a la superficie agrícola de 249 has equivale a una recarga de **0.5 hm³/año**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por evapotranspiración en niveles someros (ETR), por bombeo (B) y por flujo subterráneo (Sh). No existen salidas por flujo base en el río ni descarga de manantiales.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Esta componente corresponde a la extracción total por bombeo de agua subterránea que se realiza para los diferentes usos. Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **16.6 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas ocurren hacia Estados Unidos, a través del Arroyo El Pinto y hacia el acuífero Batevito.

El volumen fue calculado de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del nivel estático presentada para el 2007 (figura5).

En la tabla 3 se presenta el detalle del cálculo, de donde se obtiene un volumen de **2.6 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo horizontal (2007)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
S1	2264	1975	20	0.0101	0.0008	0.0183	0.6
S2	1091	1206	10	0.0083	0.0017	0.0154	0.5
S3	1430	1705	10	0.0059	0.0017	0.0143	0.5
S4	1064	550	10	0.0182	0.0017	0.0329	1.0
Total salidas							2.6

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). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

A lo largo del cauce del Río Agua Prieta, en el arroyo El Pinto (ubicado al noroeste del acuífero), el Río Punta de Agua y arroyo el Fresnal (ambos localizados al sur del acuífero), se presentan profundidades a niveles estáticos menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

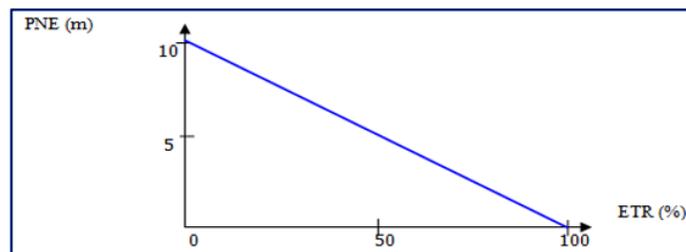
Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 348.8 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 17.3 °C y precipitación de 353.5 mm.

$$ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) = 17.3
 P (mm) = 353.5 P² = 124962.25
 L = 991.38585 L² = 982845.9
ETR (mm) = 348.8

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m y con cobertura vegetal nativa, 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 % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



La tabla 4 muestra el cálculo de la evapotranspiración, en la que se puede observar que el valor de esta componente del balance se estima en **4.9 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo de evapotranspiración en niveles someros

Intervalo curvas (m)	Profundidad Considerada (m)	Área (m ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (hm ³ /año)
0 - 1	0.5	744963	95%	0.349	0.25
01-feb	1.5	445561.6	85%	0.349	0.13
02-mar	2.5	5091681.9	75%	0.349	1.33
03-abr	3.5	5350189.7	65%	0.349	1.21
04-may	4.5	1420364.4	55%	0.349	0.27
05-jun	5.5	3818005.4	45%	0.349	0.60
06-jul	6.5	5697008.8	35%	0.349	0.70
07-ago	7.5	2466926.9	25%	0.349	0.22
08-sep	8.5	2779484.8	15%	0.349	0.15
09-oct	9.5	646508.2	5%	0.349	0.01
Total ETR (hm³/año)					4.9

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica histórica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Las escasas mediciones piezométricas de 2004 y 2005 recabadas en estudios previos, como los reportados en el Atlas de Aguas subterráneas del estado de Sonora, reflejan variaciones puntuales tanto positivas como negativas y se encuentran concentradas en una pequeña zona, por lo que no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (R_v), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$\begin{aligned} R_v &= S_h + B + ETR - E_h - R_i + \Delta V(S) \\ R_v &= 2.6 + 16.6 + 4.9 - 19.5 - 0.5 - 0 \\ R_v &= 4.1 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 4.1 + 19.5 + 0.5 \\ R &= 24.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **24.1 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **DNC = 2.5 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 **21,649,698 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 24.1 - 2.5 - 21.649698 \\ \text{DMA} &= -0.049698 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **49,698 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. "Informe del Estudio Geohidrológico Preliminar en el área de Nogales-Agua Prieta, en el Estado de Sonora (1980)", realizado por la empresa Geoexploraciones y Construcciones, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1983. "Informe Preliminar de los Servicios de Prospección Geohidrológica en la zona de San Bernardino en el Estado de Sonora", realizado por la empresa: Geólogos Consultores, S.A.