



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MAGDALENA (2612), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	5
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3	FISIOGRAFÍA.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	10
3.4	Geomorfología.....	12
4	GEOLOGÍA.....	13
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología estructural	17
4.3	Geología del subsuelo	17
5	HIDROGEOLOGÍA.....	23
5.1	Tipo de acuífero	23
5.2	Parámetros hidráulicos.....	24
5.3	Piezometría	24
5.4	Comportamiento hidráulico.....	24
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	24
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	25
5.4.3	Evolución del nivel estático	26
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	28
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	31
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	32
7.1	Entradas	32
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	32
7.1.2	Recarga inducida (Ri)	32
7.1.3	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	32
7.2	Salidas.....	33
7.2.1	Evapotranspiración (ETR).....	33
7.2.2	Extracción por bombeo (B).....	33
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	33
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	33
8	DISPONIBILIDAD	33
8.1	Recarga total media anual (R).....	34
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	34
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	34
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	35

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 Magdalena definido con la clave 2612 por la Comisión Nacional del Agua se encuentra localizado en la porción noroccidental del Estado de Sonora, comprendido dentro de la porción alta de la cuenca del Río Magdalena y cubre una superficie total de unos 9,000 km²

La porción alta de la cuenca del Río Magdalena, colinda al norte con la cuenca del Río Santa Cruz, al sur y oriente con la correspondiente al Río Sonora y al poniente con la porción baja de la cuenca del Río Magdalena ó Asunción.

Abarca parcialmente los municipios de Imuris, Magdalena y Santa Ana dentro de los cuales se encuentran las poblaciones de Imuris, San Ignacio, Magdalena, La Misión, Santa Ana, El Claro y Trincheras (figura 1).

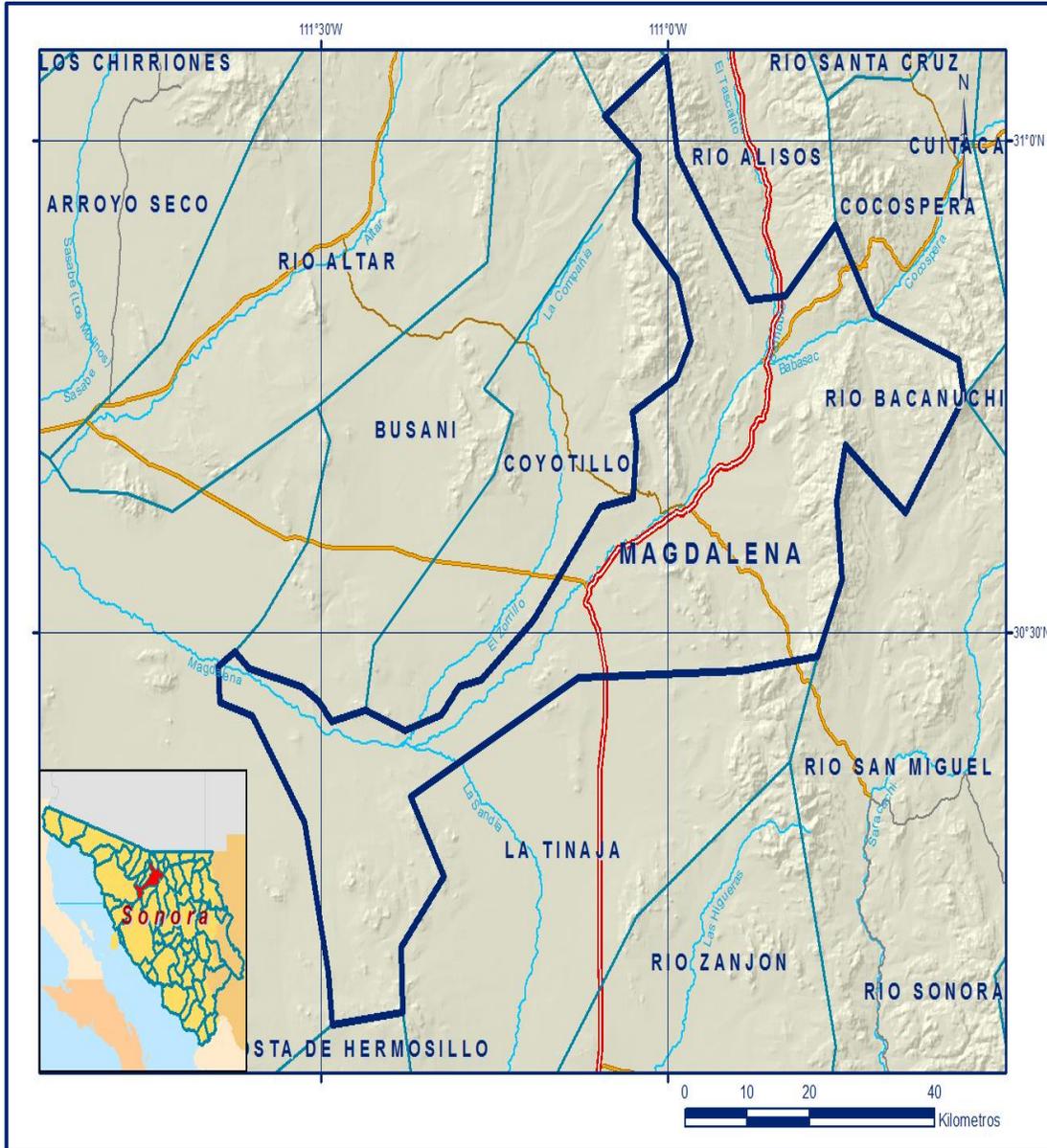


Figura 1. Localización del acuífero

En esta región, se encuentran cuatro grandes núcleos de población: Imuris, Magdalena, Santa Ana y otros de menor importancia, tales como: San Ignacio, Terrenate, Ejido El Claro, Trincheras y El Ocuca. Además, existen un buen número de rancherías y poblados muy pequeños distribuidos principalmente a lo largo del Río Magdalena y sus afluentes.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2612 MAGDALENA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	59	13.6	30	51	33.6
2	111	2	52.5	30	55	13.9
3	111	2	32.7	30	59	7.7
4	111	5	28.4	31	1	32.1
5	111	0	8.2	31	5	5.3
6	110	59	11.7	30	59	8.7
7	110	52	56.7	30	50	16.0
8	110	49	49.7	30	50	35.7
9	110	45	29.2	30	54	51.9
10	110	42	11.9	30	49	22.9
11	110	34	52.7	30	46	41.2
12	110	34	22.4	30	44	23.3
13	110	39	26.5	30	37	20.8
14	110	44	37.8	30	41	28.8
15	110	45	23.3	30	38	2.7
16	110	44	57.2	30	33	14.3
17	110	47	2.3	30	28	33.5
18	110	53	44.1	30	27	39.8
19	111	7	43.0	30	27	15.5
20	111	22	15.0	30	20	1.3
21	111	19	24.1	30	15	9.2
22	111	23	3.4	30	10	51.4
23	111	22	55.5	30	6	51.6
24	111	29	0.9	30	6	5.7
25	111	29	22.7	30	9	17.5
26	111	31	25.8	30	18	28.2
27	111	35	58.6	30	24	55.1
28	111	38	44.0	30	25	46.8
29	111	38	54.3	30	27	56.0
30	111	37	26.1	30	28	52.6
31	111	36	14.1	30	27	50.8
32	111	31	40.2	30	26	43.7
33	111	30	11.7	30	25	52.2
34	111	29	5.1	30	24	34.5
35	111	26	10.3	30	25	19.1
36	111	22	44.4	30	24	2.3
37	111	19	34.6	30	24	59.0
38	111	18	5.4	30	26	41.9
39	111	16	10.4	30	27	9.4
40	111	11	39.8	30	30	48.2
41	111	5	51.0	30	37	40.6
42	111	3	1.3	30	38	14.7
43	111	2	44.5	30	41	37.5
44	111	3	3.7	30	43	24.9
45	110	59	19.4	30	45	29.8
46	110	58	0.8	30	47	50.6
1	110	59	13.6	30	51	33.6

Por ser cabeceras municipales, Imuris, Magdalena y Santa Ana, son las ciudades principales con una población aproximada de unos 20, 40 y 30,000 habitantes respectivamente. Las otras localidades como el ejido El Claro cuenta con una población menor a 5,000 habitantes en tanto que el resto de las comunidades no son mayores a 2,500 habitantes.

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

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Magdalena se encuentra dentro de la zona de veda publicada en el Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación del 19 de septiembre de 1978, para la apertura de nuevos aprovechamientos de aguas subterráneas. Aparte de la disposición oficial señalada en el inciso anterior, no existen declaratorias de reserva o reglamentos internos.

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

Los usuarios del acuífero Magdalena son en su mayoría ejidales; encuentran afiliados a Organizaciones Campesinas como la CCI, CNC, etc. La SAGAR, brinda apoyo Técnico agropecuario a estos usuarios en forma permanente a través Centros de apoyo. Por otra parte, la Comisión Nacional del Agua, ha venido sosteniendo reuniones con los distintos usuarios del agua para la Integración del Consejo de Cuenca el cual forma parte del Consejo del Alto Noroeste.

La zona de este acuífero queda dentro de la jurisdicción del Distrito de Desarrollo Rural No 140.-Magdalena, dependiente de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Estructuralmente, la SAGAR cuenta con la oficina del distrito de Desarrollo Rural con sede en la ciudad de Magdalena, además de Centros de Apoyo Técnico en Santa Ana. La propia Dependencia ha organizado a los usuarios del sector agrícola en Unidades de Riego, las cuales se benefician con aguas de la presa El Comaquito, tomas directas y obras de aguas subterráneas como norias y pozos someros. Los usuarios mayores de agua subterránea son los del sector agrícola, seguidos con los del uso público urbano, doméstico, industrial, servicios y pecuario.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la cuenca del Río Magdalena se han realizado los siguientes estudios: En el año de 1970, la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos llevó a cabo el estudio denominado **“Estudios Hidrogeológicos en la Cuenca del Río Magdalena (Concepción)” a través de la empresa Planimex, Ingenieros Consultores, S.A.**

Este estudio abarcó la cuenca alta de los valles de Magdalena, hasta la costa, enfatizando las actividades en el valle de Caborca. Los resultados de este estudio para los valles de Magdalena, indican que la extracción en el valle de Santa Ana asciende a 24 millones de m³ al año y de 5 millones en el valle de Magdalena. No se logró cuantificar el rendimiento de seguridad en estos valles.

En el año de 1975, la misma Dependencia efectuó el estudio como **“Continuación del Estudio Geohidrológico del valle del Río Magdalena desde Comaquito hata El Claro, Estado de Sonora” por conducto de la empresa Ingenieros Civiles y Geólogos, S.A.**

Los Resultados indican una recarga de 41.5 millones de m³ anuales, de los cuales 4.0 millones de m³ son por flujo subterráneo y 37.5 millones de m³ son por la infiltración de la lluvia y de los retornos del riego. Las descargas del acuífero fueron de 48.9 millones de m³, de los cuales 21.7 millones de m³ fueron con pozos y norias, 18.5 millones de m³ fueron a través de drenajes hacia tomas de derivación del río y 8.7 millones de m³ fueron por flujo subterráneo, propiciando una disminución del almacenamiento de 7.6 millones de m³.

En el año de 1976, la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. llevó a cabo el estudio **“Interpretación de Datos y Determinación del Potencial Actual del Acuífero en la Costa de Caborca, Sonora, Ampliación de la Cuenca Alta del Río Magdalena” para la misma SRH.**

Este estudio se enfoca hacia los valles aguas abajo de Trincheras y hasta la zona costera, tomando como base los resultados del Estudio anteriormente citado.

Finalmente en el año de 1980, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos contrató a la empresa Proyesco, S.A. para realizar el **“Estudio geohidrológico preliminar de la Cuenca Alta del Río Magdalena en el Estado de Sonora”.**

Este estudio analiza las subcuencas de Arroyo seco, El Búsani y Benjamin Hill con apoyo en la información de los estudios anteriores.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área de estudio queda dentro de la Provincia Fisiográfica de la Zona Desértica de Sonora (Manuel Alvarez Jr. 1958) 1. Por su morfología, también puede clasificarse dentro de una subprovincia de sierras y valles paralelos.

Se puede observar que tanto las sierras como los valles, tienen una orientación predominante norte-sur; la elevación de las sierras alcanza hasta los 1,500 metros en la cabecera de la cuenca y de 800 metros aproximadamente en la porción sur de la misma. La elevación de los valles es de 1000 metros para los ubicados en el norte de la cuenca, (Río de Los Alisos), disminuyendo paulatinamente hasta los 300 en el valle de Llano Blanco.

Las Sierras están formadas principalmente por orcas metamórficas del Paleozoico y Precámbrico, siguiéndoles en importancia las rocas volcánicas del Mesozoico y Terciario. Sobre estas rocas, se encuentran descansando los sedimentos del Terciario y Cuaternario que colman los actuales valles. Estos sedimentos, están constituidos por boleas, gravas, arenas y arcillas.

En la porción nororiental del área, existen aflorando, además, grandes espesores de conglomerados que forman las terrazas de los valles del Río de los Alisos y de los valles de Magdalena y Santa Ana.

La zona tiene como dren principal al Río Magdalena, el cual recibe a sus más importantes tributarios por la margen derecha como son: el Río de Los Alisos, Arroyo Coyotillo, Búsani y Río Altar. Por la margen izquierda confluyen a él los arroyos de la Tinaja y El Sotol.

La fisiografía de la región puede definirse a grandes rasgos, como un sistema de sierras y valles paralelos labrados y comunicados entre sí por arroyos de régimen torrencial y su colector general, que son los responsables principalmente de haber originado el retroceso hacia los escarpes de las sierras, de las amplias terrazas de erosión expuestas en el área.

3.2 Clima

El Clima imperante en esta región es de tiempo semidesértico con un período de lluvias definido entre los meses de Julio a septiembre.

Las más altas precipitaciones anuales se presentan entre Magdalena y la Sierra de Santa Rosalía o de La Madera oscilando entre 500 y 600 mm.

En el resto del área la precipitación anual varía entre 225 y 500 mm. La temperatura media varía desde 15° C en la cabecera de la cuenca hasta 22° C en el valle de Llano Blanco.

El Río Concepción se origina en las montañas al noreste de la zona de estudio, que corresponde a la zona montañosa norte centro del Estado, donde de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Koppen modificado por E. García en 1964, para adaptarlo a las condiciones particulares de la República Mexicana (cartas de climas, Comisión de Estudios del Territorio Nacional), prevalece un clima seco-templado con verano cálido, muy extremoso, pues su oscilación es de 18° C, con temperatura media anual es de 17.8° C, la más fría de 9° C y la más caliente de 27° C; su régimen de lluvias es de verano, pero con un porcentaje de lluvia invernal de 22% respecto a la media anual, su clasificación es BS, KW (x') 8e').

En su curso inferior, que ocupa la mayor extensión del área de estudio, prevalece un clima más seco, semicálido con invierno fresco, extremoso, su oscilación es de 17.6° C, la temperatura media anual es de 20.2° C, la más fría de 11.5° C y la más caliente de 29.2° C, con régimen de lluvia de Verano, pero con un porcentaje de lluvia invernal de 17% respecto a la media anual, su clasificación es BS hw (x') (e').

En la parte baja y sur del área de estudio (Llano Blanco), predomina el clima muy seco o desértico, cálido y extremoso, pues la temperatura oscila en 19.5°, su temperatura media anual es de 20.3° C y la del más frío de 11.3° C y el más caliente de 30.8° C con régimen de lluvia intermedio entre verano e invierno, su clasificación es BWhw (x') (e').

El análisis climatológico del área, efectuó por medio de datos disponibles de precipitación pluvial, temperatura y evaporación potencial, registrada en 9 estaciones climatológicas, de las cuales, tres se localizan dentro de los límites del área y seis fuera de ella, en su periferia.

El período común más reciente y con datos completos de las observaciones en estas estaciones fue de 11 años y corresponden al intervalo de 1966-1976. El análisis de precipitación, temperatura y evaporación potencial del área de estudio se realizó para el período común de registro, empleándose el método de polígonos de Thiessen.

El análisis de precipitación pluvial se llevó a cabo para la superficie total del área de estudio y parcialmente para las subcuencas hidrográficas tributarias de los valles más importantes de esta zona, desde el punto de vista geohidrológico.

Estos valles son; Llano Blanco, Búsani, Coyotillo, Benjamin Hill, Comaquito-El Claro y Los Alisos. La temperatura media anual del área es de 20.7° C, siendo muy similares a las temperaturas medias anuales, tanto en las zonas montañosas como en la planicie. La temperatura máxima anual en el período de análisis 1966-1976, fue de 22.3° C y correspondió al año de 1968 y correspondió al año de 1968 y la mínima anual fue de 19° C para el año de 1974.

La precipitación media anual del área de estudio para el período 1966-1976 fue de 323.9 mm. Como puede observarse, la altura de precipitación promedio registrada en las estaciones climatológicas, varió entre 227.8 mm y 547.0 mm, presentándose las más altas precipitaciones en las partes montañosas y las más bajas en las planicies.

De acuerdo con el número y distribución de las estaciones climatológicas de la cuenca, la denominada Santa Ana, es la más representativa, debido a que en ella se registran las precipitaciones anuales más próximas a la media anual de la cuenca, esta estación se localiza en la porción central del área de estudio.

La lluvia mínima anual en el área fue de 162 mm y se presentó en el año de 1974, la máxima anual fue de 474.1 mm y ocurrió en 1967. En la subcuenca del Río Los Alisos la precipitación media anual fue de 474.1 mm y ocurrió en 1967.

En la subcuenca del Río Los Alisos la precipitación media anual fue de 409.7 mm. La precipitación media anual en la subcuenca del Arroyo Coyotillo fue de 333.3 mm. En la Zona de Comaquito-El Claro 369.0 mm; en la subcuenca del Arroyo La Tinaja (Benjamin Hill) la precipitación media anual fue de 348.4 mm; en la subcuenca del Río Busani (Valle del Ocuca) fue de 319.4 mm y en la zona de Llano Blanco y Trincheras la precipitación media anual fue de 264.7 mm.

Como puede observarse, en el área de estudio las precipitaciones más altas se presentan en la subcuenca hidrográfica del Arroyo Los Alisos y la más baja en la planicie (Pitiquito).

La evaporación potencial media anual es de 2,328 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero Magdalena queda comprendido dentro de la Región Hidrológica RH 8-Sonora Norte. De acuerdo con la clasificación hidrológica que se dispone para esta zona, no se tiene información sobre subregiones hidrológicas.

El acuífero Magdalena, se ubica dentro de la cuenca 8D-Río Concepción o Magdalena. Dentro de esta gran cuenca hidrográfica del Río Magdalena se encuentra el Río Magdalena el cual inicia el labrado de su cuenca al Noroeste de Cananea, a una altura de casi 2,000 metros sobre el nivel del mar, por una corriente que desde este punto hasta el poblado de Magdalena, lleva el nombre de Río de los Alisos. De Magdalena a Caborca, la corriente toma el nombre de Río Magdalena; de esta ciudad. Hasta la confluencia con el arroyo El Coyote se conoce como Río Asunción y de este lugar hasta su desembocadura en el Golfo de California, recibe el nombre de Arroyo de la Concepción.

Los límites de la cuenca son: al oriente, la Cuenca del Río Sonora; al sur, la Cuenca del Río Sonora; al sur, la Cuenca del Río San Ignacio y Zanjón; al norte, las Cuencas de los Ríos Santa Cruz, San Pedro y Puertecito, que escurren hacia el territorio de los Estados Unidos de Norteamérica; al noroeste, las cuencas de corrientes poco definidas que descargan directamente al Golfo de California. Políticamente, forman parte de ella los municipios de Imuris, Magdalena, Santa Ana, Trincheras, Altar, Trubutama, Sáric, Benjamín Hill, Pitiquito Nogales y Atíl.

El Río Magdalena ó Concepción, es la corriente más importante de la Región Hidrológica No. 8, ya que drena una superficie de 25,757 kilómetros cuadrados, de los cuales, 10,052 km², corresponden el área de este estudio.

La topografía de la cuenca dentro del área de estudio, se caracteriza por grandes extensiones de terrenos planos en las zonas medias y bajas. Tiene una altitud media de 700 metros aproximadamente y máxima de 2,530 metros al norte de Cananea.

El río Magdalena nace con el nombre del Río Casa de Piedra (fuera del área de estudio) en el Cerro Vereda, a una altitud de 2,000 metros sobre el nivel del mar 9 kilómetros al sureste de Santa Cruz, en el parteaguas del Río Santa Cruz que escurre hacia los Estados Unidos de Norteamérica. Su cauce sigue un rumbo sureste, recibe por su margen derecha al Arroyo San Antonio, a una altitud de 1,100 metros todavía fuera del área de estudio y cambia su nombre por el de Arroyo Cocóspera.

En el Arroyo Cocóspera se efectuaron observaciones del nivel del río en la estación Comaquito, actualmente suspendida. El arroyo Cocóspera recibe las aportaciones de su primer afluente importante, el Río de los Alisos, inmediatamente aguas debajo de Imuris, por su margen derecha, a una altitud de 840 metros y toma el nombre de Río Los Alisos hasta las inmediaciones de Magdalena, donde el colector general fluye por zonas de topografía más suave y se inician los aprovechamientos de sus escurrimientos.

A partir de Magdalena, el colector general toma el nombre de esta población y continúa con curso suroeste; pasa por la población de Santa Ana, cruza la Carretera Hermosillo-Nogales y aguas abajo, a la altura del Ejido La Tinaja, recibe por su margen derecha al Arroyo Coyotillo a una altura de 550 metros sobre el nivel del mar. La subcuenca hidrológica a la que pertenece este acuífero es la 8D-3, Río Alisos en su parte media y baja.

La infraestructura hidráulica que se tiene en este acuífero consiste de una presa de almacenamiento El Comaquito, que se ubica en la parte alta del acuífero. De esta presa salen los canales de riego revestidos y de tierra que benefician las zonas de riego en su mayoría ejidal, que se localizan en ambas márgenes del río.

Por otra parte, existen obras de captación del agua subterránea a través de pozos y norias equipados en su mayoría con motores eléctricos y en menor proporción (5%) con motores de combustión interna además de una cantidad mínima de norias de operación manual. De acuerdo con los gastos de operación la potencia de los motores varía de 5 a 50 HP.

Los sistemas de riego son generalmente a base del sistema tradicional de riego por gravedad, existiendo superficies pequeñas con riego por aspersión.

3.4 Geomorfología

En términos generales, el área de estudio es alta. La elevación media del angosto valle del río Magdalena, es de 535 metros. Hacia ambas márgenes, las terrazas fluviales y de erosión, aumentan paulatinamente en elevación hasta llegar a una altitud promedio de 700 metros en los escarpes litológicos y estructurales de las sierras que circundan el valle, así como las de las sierras interiores.

La región vista de conjunto, puede calificarse como una subprovincia fisiográfica formada por un sistema de sierras y valles paralelos. Las sierras están compuestas por rocas ígneas intrusivas, volcánicas y metamórficas de edades Precámbricas a Cuaternarias, en tanto que los valles con sus correspondientes formas secundarias, están constituidas por sedimentos clásticos Terciarios y Cuaternarios.

Tal como corresponde a los paisajes de estas zonas áridas, la morfología del área estudiada se acentúa bien en cada una de sus unidades orográficas y de formas menores, haciendo resaltar la evolución de los extensos pié de monte a terrazas aluviales y de éstas últimas a cauces fluviales.

Estas unidades morfológicas son de una gran importancia en la recepción y transmisión del agua que interviene en el ciclo hidrológico del área; dependiendo de sus características litológicas y del grado de compactación de sus elementos constituyentes, pueden representar áreas de infiltración, almacenamiento, transmisión, retención temporal o solamente de escurrimiento del agua de precipitación.

De entre estas características, la correspondiente a la infiltración puede ser evidencia en principio, mediante la observación, medida e interpretación de los diferentes tipos de drenaje superficial del área. La densidad de drenaje por ejemplo, es uno de los parámetros en que se apoya en análisis hidrogeológico y se desprende de uno de los apartados más importantes de la fisiografía.

Dentro del área estudiada, las áreas impermeables ocupan la mayor superficie y están representadas por una alta densidad de drenaje de tipo arborecente o dendrítico, desarrollado principalmente en las partes altas o de taludes y terrazas de fuerte pendiente; en tanto que hacia las partes planas, la densidad de drenaje disminuye y el arroyo es de tipo ordenado y paralelo.

Los arreglos de drenaje mencionados, aportan los escurrimientos superficiales a los colectores principales de la margen derecha del Río Magdalena, como son los Arroyos Búsani, Coyotillo y Río de los Alisos, a través de sus cuencas tributarias.

Los arroyos de la margen izquierda del colector general, tienen una importancia secundaria en relación con los de la margen opuesta, evidenciada por los caudales escurridos y los conos de deyección observados, cuyas masas no han alcanzado a ser removidas completamente.

Esta capacidad de volumen transportados y fuerza de trabajo de corte y remoción de masa, puede ser puesta para una altura de precipitación pluvial similar, en función del área de captación, siendo la mayor de la margen derecha en 1.5 veces aproximadamente, en relación con la de la margen izquierda.

En resumen, el área estudiada puede calificarse como una provincia fisiográfica de sierras y valles paralelos; ambas unidades morfológicas están orientadas en una dirección sensiblemente norte-sur y con desniveles topográficos entre los valles, que oscilan de 200 a 800 metros.

Las sierras y formas sobresalientes, están constituidas por sedimentos Precámbricos y Paleozoicos, rocas metamórficas del Mesozoico y rocas intrusivas y volcánicas de Cretácico, Terciario y Cuaternario. Las áreas peneplaneadas, están a su vez formadas por sedimentos clásticos, Terciarios y Cuaternarios.

Los valles aluviales y fluviales, están intercomunicados superficialmente por el Río Magdalena que recoge los escurrimientos superficiales de los mismos.

Las diversas etapas de erosión que han prevalecido en el área han devastado las prominencias topográficas y han dado lugar a la formación de unidades construccionales secundarias, que confieren al área un paisaje de juventud tardía.

4 GEOLOGÍA

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica de las rocas que afloran en el área, forma una columna geológica, cuya edad comprende desde el Precámbrico Inferior hasta el Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológica se presenta en la figura 2. A continuación, se describen estas unidades, desde la más antigua a la más joven.

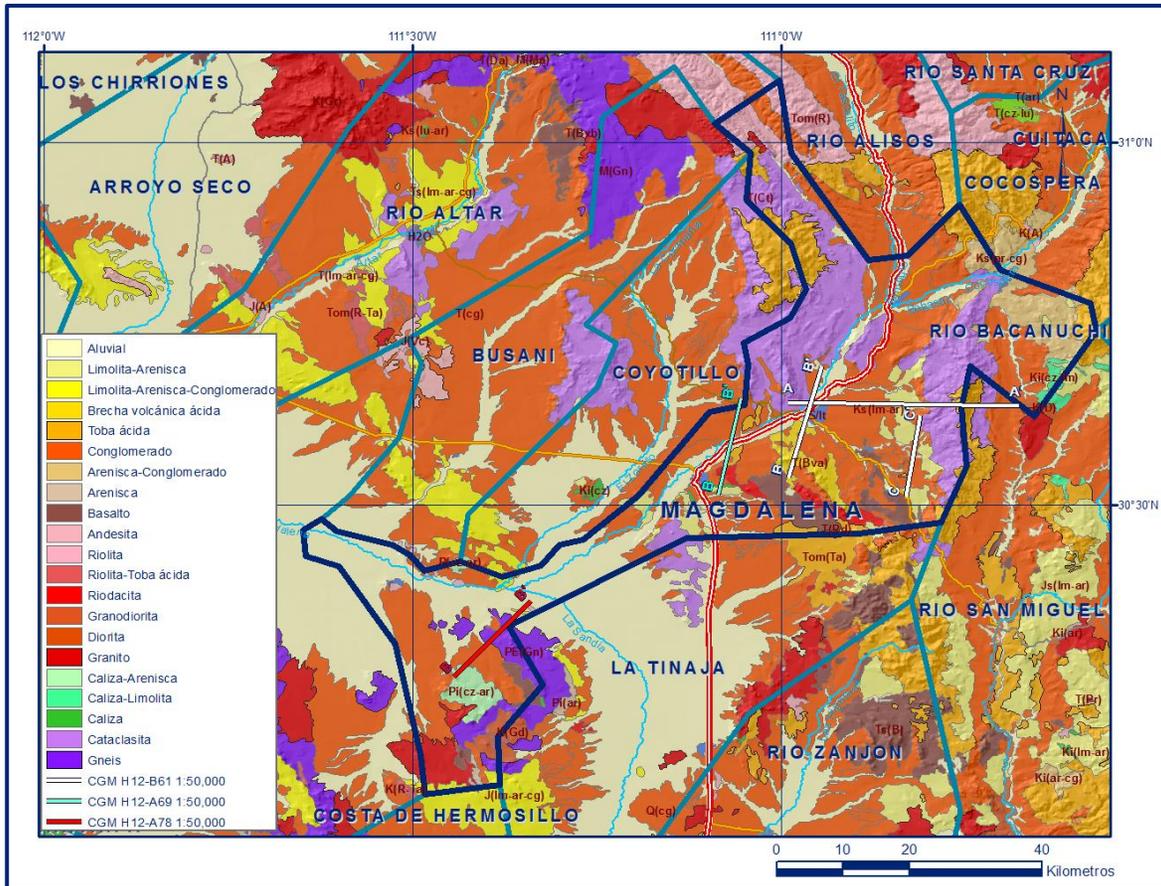


Figura 2. Geología general del acuífero

PRECÁMBRICO Y PALEOZOICO

Agrupadas en las rocas de Edad Precámbrica y Paleozoica, se encuentran: Calizas con pedernal, calizas, areniscas, dolomitas y algunas formaciones metasedimentarias del Cámbrico. Todos los afloramientos de esta unidad, representan remanentes de erosión que aún subsisten a pesar de su antigüedad y al fuerte trabajo de degradación al que se han visto sujetos.

Los afloramientos pertenecientes a esta unidad geológica, quedan distribuidos en toda el área de estudio, ocupando el 50% en lo que respecta a superficie de afloramiento de unidades rocosas, representando por consiguiente en gran proporción, el marco geológico de la cuenca estudiada. En la porción noroeste forman la estribación sur la Sierra de Guacomea, el Cerro La mesa, San Blas y Las Sierras Las Jarrillas y del Picacho. Al noroeste los Cerros Colorado, La Cuchilla, Cabeza Colgada, del Arituaba y Carnero. Al sureste, existe un remanente alargado formado por los Cerros El Claro y Santa Julía.

En la porción sur, forman los Cerros Dividido, del Cabrillo y del Dieciséis y finalmente, en el límite suroccidental, forman las Sierras de San Blas y Santa Rosa y los Cerros Clemente, El Chino y Cerro Prieto. Las rocas agrupadas en esta unidad, forman el basamento regional del área.

MESOZOICO

Las rocas correspondientes a la era Mesozoica, tienen dentro del área de estudio, una extensa distribución horizontal.

A través de las edades del Triásico, Jurásico y Cretácico, puede observarse una secuencia de rocas intrusivas y metamórficas que corresponden a granitos y granodioríticas, así como a unidades de roca indiferenciadas y emisiones de rocas volcánicas producidas a finales de esta era geológica.

Las rocas intrusivas tienen sus mayores expresiones al sur de Trincheras, formando los Cerros Redondo y Boludo y la Sierra del Caracahui al noreste de Benjamín Hill. Otros afloramientos de menor extensión se observan al oriente de Imuris, representado por el Cerro Agua Caliente.

Descansando sobre estos cuerpos intrusivos, se localizan algunos afloramientos formados por sedimentos no diferenciados, teniendo una reducida área de exposición. Estos se presentan únicamente en los alrededores de Benjamín Hill y la Ranchería de Aguacaliente, localizada en el tramo medio del Río de los Alisos.

Finalmente, y como última evidencia de los acontecimientos registrados en esta Era, se localizan las rocas volcánicas emitidas a finales del Cretácico, las cuales siguieron extravasándose durante la Era Cenozoica, a principios del Terciario.

Las rocas expuestas corresponden a materiales volcánicos no diferenciados y derrames lávicos de composición riolítica, andesítica y latítica.

Generalmente, estas rocas se encuentran distribuidas en la parte norte de la zona estudiada, formando sierras de gran extensión, como la de Cuacomea, Cibuta y Los Pinitos, representadas por derrames riolíticos y el Cerro Candelaria formado por rocas volcánicas indiferenciadas. En la porción sureste alcanza expresiones algo considerables, como son las Sierras de la Lámina y del Otate y Cerro La Bandera.

Existen otros afloramientos de menor importancia en la porción central y suroccidental de los cuales destacan la Sierra Prieta y Cerros del Arituaba, del Tecolote y Rajón, todos ellos de composición andesítica y latítica.

CENOZOICO -TERCIARIO

Las rocas comprendidas dentro de la subcuenca hidrográfica, correspondientes a este período, forman parte de las mismas emisiones registradas a fines del Cretácico, las cuales continúan hasta el Reciente.

Las rocas expuestas corresponden a rocas volcánicas, representadas en su mayoría por riolitas, andesitas, latitas y tobas.

Estas últimas, en la porción suroeste se encuentran mezcladas con sedimentos fluviales y aluviales del Cuaternario, ocupando los depósitos tobáceos, pié de monte o depósitos de talud y terrazas erosionales y fluviales, los depósitos fluviales Cuaternarios, cortan a los depósitos de tobas en los cauces de los enumerables arroyos que descienden principalmente por la margen izquierda, como el Arroyo del Tecolote, del Sotol y el de La Tinaja, para confluir en el Río Magdalena.

La última evidencia de los acontecimientos ocurridos durante este período, se registra al final del Terciario y principios del Cuaternario, siendo las representantes las emisiones basálticas, las cuales se encuentran distribuidas en los alrededores de la población de Trincheras y al sureste del área en la Sierra del Otate.

CUATERNARIO

Comprendidas dentro del Cuaternario, se encuentran las rocas que ocupan la mayor superficie dentro del área estudiada.

Las rocas Cuaternarias están divididas en volcánicas y sedimentarias.

En el grupo de las volcánicas, son las emisiones basálticas las representantes de las sedimentarias que, por su distribución y por su naturaleza, representan para el caso del estudio geohidrológico que nos ocupa, la unidad geológica de mayor importancia.

Formadas por arenas, gravas, limos y arcillas, se encuentran distribuidas en tres grandes grupos: depósitos aluviales, fluviales y erosionales.

Los depósitos aluviales, ocupan las áreas peneplaneadas o áreas de valle, correspondiendo a los depósitos fluviales, las terrazas excavadas por las corrientes superficiales que descienden hacia la planicie aluvial y a los erosionales, los productos de desintegración física, mecánica y de remoción de masas depositadas en los sedimentos de sierras y cerros aledaños.

Aunque la distribución horizontal de los sedimentos clásticos ocupa la mayor superficie de la subcuenca, solamente en la porción central del área, entre Trincheras y Pitiquito y en los Valles de Santa Ana y Magdalena, existen espesores entre 75 y 100 metros de promedio de aluviones en el resto del área, solamente en los pequeños valles labrados por ríos y arroyos, se depositan algunas decenas de metros de estos sedimentos, existiendo en la mayor parte una delgada cubierta de estos materiales aluviales. En cambio el espesor medido en el conglomerado Cuaternario (Qcg) que aflora desde Santa Ana a Nogales, es del orden de los 800 metros.

La discusión de las características de estos sedimentos aluviales y fluviales, inherentes a su espesor y distribución en el subsuelo, así como sus características físicas que tienen relación con el agua subterránea, se realizará en parte en el inciso correspondiente a geología del subsuelo y el complemento en el capítulo correspondiente a hidrología subterránea.

4.2 Geología estructural

La Cuenca del Río Magdalena, pertenece a la cuenca geológica “Cuenca de Sonora”. Esta cuenca geológica está limitada al Este, por la estructura del Gran Geoanticlinal Occidental; al Sur, por el Flanco de Sinaloa y al Occidente por la Fosa de Cortés.

Esta cuenca se caracteriza por la presencia de afloramientos Precámbricos y Paleozoicos, representado por rocas sedimentarias, metasedimentarias e intrusivas.

4.3 Geología del subsuelo

Tomando en cuenta el resultado del levantamiento fotohidrogeológico en combinación con la nomenclatura propuesta en el trabajo denominado “Areal Geology and Petrology of the igneous Rocks of the Santa Ana Región, Northwest Sonora” por G.A. Salas, publicado en el boletín de la sociedad Geológica Mexicana, Vol. 23 No 1 (1968-1970), fue posible identificar formaciones desde el Precámbrico hasta el Reciente. El resultado de esta interpretación se resume como sigue:

Precámbrico.- Las rocas de esta edad están representadas por formaciones metasedimentarias del tipo esquistos, mármol y gneises graníticos con intrusiones graníticas metamorfoseadas y rocas metamórficas del grupo Coyotillo, del tipo filitas, cuarcitas y metaconglomerados intrusionados localmente por diques andesíticos. Debido a su alto grado de metamorfismo, estas rocas se consideran impermeables y compactas.

Cratácico.- Las rocas pertenecientes a esta edad, son de la formación Represo, de facie calcárea, en donde predominan fundamentalmente calizas en estratos gruesos asociados a rocas intrusivas.

Le sigue la formación Represo, facie clástica, que contiene principalmente grauvacas, limolitas y lutitas, y por último existe un grupo de andesitas no diferenciadas asociadas con calizas muy recristalizadas con colores rojizos. Todas estas formaciones son totalmente impermeables y únicamente constituyen fronteras al flujo del agua subterránea.

Terciario.- En las rocas de esta edad se identificaron rocas volcánicas no diferenciadas consistentes de andesitas, brechas volcánicas, basaltos y tobas. Otra formación Terciaria es el Conglomerado Rojo que se observa compacto formado por fragmentos de rocas metamórficas y volcánicas cementados en matriz arenosa rojiza y arcillosa. La formación más reciente del Terciario, es la formación Baucarit que está constituida por rellenos aluviales antiguos localmente estratificados formados por gravas, arenas y arcillas parcialmente consolidados.

De estas tres formaciones, la de mayor importancia es la formación Baucarit que está representada en la zona como la unidad de mayor extensión y que tiene características de una formación parcialmente permeable, mientras que las otras dos formaciones se consideran impermeables.

Cuaternario.-

Los materiales pertenecientes a esta edad están constituidos principalmente por gravas y arenas producto de la erosión y depósito de la formación Baucarit y de las demás rocas circundantes, habiéndose podido diferenciar los acarreo fluviales recientes de las terrazas fluviales. Estos materiales representan los acuíferos más importantes del valle del Río Magdalena.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las únicas formaciones de importancia son los materiales del Cuaternario, representados por los aluviones y terrazas antes indicadas. Estos materiales descansan a su vez parcialmente sobre los depósitos clásticos de la formación Baucarit que es de mucho menor permeabilidad aparente y en algunas partes sobre el relieve sepultado de las rocas más antiguas tanto del Cretácico como del Precámbrico.

Esta diferencia de compacidad relativa entre la formación Baucarit y los remanentes de las rocas más antiguas, dio lugar a la división del valle del Río Magdalena en varios tramos separados por estrechamientos constituidos por las formaciones más antiguas que restringen la sección de flujo del agua subterránea en los acuíferos. Esta serie de rocas impermeables ha provocado la separación del valle longitudinal en una serie de tramos perfectamente definidos que funcionan como unidades hidrogeológicas independientes y que se describen a continuación:

Tramo: Comaquito-Imuris

Este tramo se limita entre la salida del Arroyo del Babasac de la Sierra de la Madera y un estrangulamiento a la altura del poblado de Imuris. Lateralmente queda encajonado por depósitos clásticos de la Formación Baucarit encontrándose en algunas partes - las Terrazas 1 y 2 en ambas márgenes.

A la altura del estrechamiento de Imuris afloran sobre la margen izquierda rocas metamórficas, que producen un levantamiento en el subsuelo que provocó la salida de agua subterránea en las tomas denominadas El Bacerán, Agua Caliente 1 y 2, San Isidro y la del Río Bambuto.

Este tramo tiene - una longitud de 11 km con un ancho medio del cauce aluvial reciente de 600 m.

Las entradas a este tramo provienen de la Toma Babasac en su parte alta, de la infiltración por los escurrimientos de avenidas y las lluvias directas que caen sobre la parte acuífera.

Puede existir otra recarga más lenta proveniente de los materiales elásticos semiconsolidados de la Formación Baucarit en ambas márgenes del valle. Las salidas están constituidas por las tomas antes indicadas, con excepción de la del Bambuto y el flujo subálveo que puede existir en el estrangulamiento.

Tramo: Imuris-San Ignacio.

Queda limitado lateralmente por rocas metamórficas del Precámbrico que bordean ambos márgenes del tramo y forman un estrechamiento angosto a la altura de las tomas de la Isla y el - Ranchito, con un ancho máximo de 200 m. Sólo sobre la margen derecha se encuentran algunas terrazas, mientras que sobre la margen izquierda casi no existen. El largo total este tramo es de 10.5 km con un ancho de medio en la parte media del acuífero aluvial reciente de 500 m.

Las entradas a este tramo corresponden a las salidas del tramo Comaquito-Imuris y a las aportaciones de la toma del río Bambuto, así como de los arroyos de Agua Zarca y Piedra de Amolar. El resto de las entradas proviene de los escurrimientos de avenida y la infiltración de la lluvia sobre la parte plana del valle. No deben existir aportaciones de las rocas metamórficas. La salida está constituida por las descargas de las tomas de la Isla y El Ranchito y probablemente el flujo subálveo debe ser prácticamente nulo.

Tramo San Ignacio-Magdalen

En su parte alta queda enmarcado por el estrechamiento a la altura de las tomas El Ranchito y la Isla, y hacia aguas abajo por un estrechamiento geológico a la altura de la población de Magdalena. Sobre su margen izquierda queda bordeado por los depósitos clásticos parcialmente consolidados de la formación Baucarit y sobre la derecha por rocas metamórficas del Precámbrico. La longitud de este tramo es del orden de 10 km con un ancho medio de 1000 m.

El estrechamiento de la salida a la altura de Magdalena está formado por afloramientos en el cauce de rocas metamórficas del Precámbrico y sobre su margen izquierda por un pequeño afloramiento de Conglomerado Rojo compacto e impermeable del Terciario.

Las entradas a la zona están formadas por las salidas del tramo Imuris-San Ignacio y las aportaciones del Arroyo de Tacícuri. Deben existir además aportaciones por infiltración de los escurrimientos de avenida y la infiltración por lluvia, así como escurrimientos lentos provenientes de los materiales elásticos de la formación Baucarit desde la margen izquierda. La salida del valle está formada por la Toma de La Misión y la descarga de la Toma La Angostura aguas abajo del estrechamiento de Magdalena.

Tramo Magdalena-La Galera

El tramo superior de esta zona queda delimitado por - el estrechamiento a la altura de Magdalena y hacia aguas abajo por - otro estrechamiento a la altura de Santa Martha. En este último estrechamiento se observan en ambos márgenes afloramientos de lutitas y areniscas de la Formación Represo, que funcionan como levantador del agua subterránea. Lateralmente el valle queda formado sobre su margen izquierda en la primera mitad por rocas volcánicas andesíticas asociadas con calizas y en la segunda parte por materiales elásticos de la Baucarit. Sobre la margen derecha colinda en su primer tramo también con las rocas volcánicas antes indicadas y hacia abajo con los materiales elásticos de la Formación Baucarit.

La longitud total de este tramo es de 10.5 km con ancho medio del valle aluvial reciente del orden de 1,250 m. Las aportaciones a este tramo provienen de las salidas del tramo San Ignacio-Magdalena, así como de la infiltración de los escurrimientos de avenida que transitan por esta zona y la infiltración de lluvia directa sobre el valle aluvial. Deben existir también aportaciones lentas de la Formación Baucarit en ambos márgenes. Las salidas están representadas por las tomas de la Galera y Santa - Martha

Tramo: La Galera - El Sifón

Este tramo, que es el más amplio y más largo, queda - delimitado aguas arriba por el estrechamiento de la Galera y hacia aguas abajo por la zona de El Sifón El Claro, que se encuentra enmarcado lateralmente por rocas metamórficas del Precámbrico del grupo - Coyotillo. La margen izquierda está formada principalmente por rocas elásticas de la Formación Baucarit, con algunos afloramientos aislados de calizas y areniscas de la Formación Represo y en su parte cercana al Sifón El Claro afloran únicamente areniscas y lutitas de esta formación.

La margen derecha está formada casi exclusivamente por los depósitos elásticos de la Formación Baucarit, con excepción del tramo cercano al Sifón El Claro. El valle tiene una longitud total de 14 km y un ancho medio en su parte aluvial reciente de 2,000 m.

Las entradas al valle están formadas por las salidas del tramo anterior y por otro lado por la infiltración que ocurre durante los escurrimientos de avenidas y la proveniente de la lluvia - directa sobre el valle. La Formación Baucarit debe constituir también una aportación de importancia, debido a su gran extensión que con el valle aluvial reciente. Las salidas están representadas por los caudales que salen a través del tajo y Sifón El Claro en el estrechamiento del mismo nombre.

Tramo: El Sifón-Ejido El Claro

Este tramo, que es el último de la zona de estudio, está limitado únicamente en la parte alta por el Sifón El Claro y en su parte baja no existe una delimitación geohidrológica, sino que el valle es abierto extendiéndose unos 5 km aguas abajo del poblado Ejido El Claro. Con excepción de la zona del estrechamiento del Sifón El Claro ambas márgenes de este tramo quedan formadas por los depósitos elásticos de la Formación Baucarit.

Las aportaciones a esta zona quedan representadas por los escurrimientos del Tajo y Sifón El Claro, los escurrimientos de avenida que lleguen a infiltrarse durante su tránsito en este tramo y la lluvia directa sobre la parte plana del valle. Debe existir -- también una aportación importante pero lenta de los depósitos clásticos de la formación Baucarit en ambas márgenes. Este tramo tiene un largo total de 9.5 km con un ancho medio de 1,500 m. Las salidas del valle son únicamente subterráneas, ya que no existen tomas ni derivaciones en esta zona Geofísica

Con el objeto de poder definir la delimitación vertical y lateral de los materiales acuíferos recientes se llevó a cabo en el año de 1974 una investigación por medio de 120 sondeos eléctricos verticales de resistividad, que se localizaron sobre 23 secciones transversales al valle del Río Magdalena.

Estos sondeos se hicieron empleando el método Schlumberger con tendidos máximos entre los electrodos de corriente de 320 m. Para la interpretación de estos sondeos se emplearon dos criterios fundamentales.

El primero correspondió a la interpretación de los tramos entre los umbrales aparentes que se mencionan en el inciso anterior y el otro fue el aplicado para la interpretación de las secciones localizadas en los umbrales.

Para el caso de las zonas intermedias de los umbrales se tomó en cuenta un cambio de una resistividad alta hacia una menor, que debe coincidir con el contacto entre el material aluvial y los depósitos del tipo que evidentemente se encuentran más empacados con materiales arcillosos, por - lo que su resistividad debe ser menor. En la zona de los umbrales o estrechamientos, el criterio de interpretación fue el de identificar de una resistividad menor hacia una mayor, o bien infinita, un cambio de acuerdo con la existencia de rocas compactas en la base de los materiales acuíferos aluviales.

En ambos casos no se contó con calibraciones y por lo tanto las interpretaciones que se presentaron deben de considerarse como tentativas.

Los espesores de las capas acuíferas en las partes intermedias variaron entre 10 y 30 m aproximadamente, mientras que a - la altura de los estrechamientos estos fueron muy reducidos del orden de 5 a 6 m. Las resistividades registradas en las capas acuíferas fueron muy variables desde valores alrededor de 30 m hasta máximos de alrededor de 400 m. La resistividad del horizonte más arcilloso, que se interpretó como perteneciente a la Formación Baucarit fue variable entre 7 y 30 m.

Partiendo de las interpretaciones de los perfiles individuales, se efectuó una correlación longitudinal del valor de la profundidad de la capa acuífera aluvial reciente, llegándose a establecer configuraciones de la profundidad a la base acuífera.

En el tramo Comaquito- Imuris los valores máximos de profundidad variaron entre 10 y 45 m, notándose la presencia de un umbral somero a la altura del poblado de Imuris.

En el tramo Imuris - San Ignacio la configuración relativa a la profundidad de la base acuífera mostró variaciones desde valores mínimos de 5 m hasta máximos de 30 m.

En el tramo San Ignacio - Magdalena los valores máximos de la profundidad variaron entre 30 y 40 m, con reducciones fuertes a la altura de las tomas del Ranchito, la Isla y cerca del poblado de Magdalena. La profundidad aproximada de los materiales del acuífero, en el tramo Magdalena - La Galera varió entre 10 y 15 m, y mínimo de 8 m a la altura del estrechamiento de La Galera. Se encontraron valores máximos de la profundidad del material acuífero de 40 y 50 m en el tramo La Galera - Sifón - El Claro, que se reducen en general a valores entre 10 y 15 m en la mayor parte de la zona. En el tramo El Sifón - El Claro los valores de la profundidad de la base acuífera varían de mínimos de 10 m hasta máximos de 30 m.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

A lo largo de la zona del Río Magdalena, se pudieron identificar las unidades hidrogeológicas descritas en los capítulos anteriores. De la interpretación y análisis de información disponible de cortes litológicos, se concluyó que el acuífero en estudio se encuentra contenido principalmente en materiales granulares no consolidados depositados por el Río.

Este acuífero funciona como Libre. Debajo de las capas granulares, se encuentran estratos de conglomerados no consolidados que representan la segunda unidad hidrogeológica de interés. Por el contenido arcilloso de estos materiales, el acuífero contenido en estas formaciones funciona localmente como acuífero semiconfinado. Partiendo de las interpretaciones de los estudios geofísicos y tomando en cuenta la profundidad media de los niveles estáticos, fue posible definir el volumen aproximado de los sedimentos saturados, así como el espesor medio saturado de los acuíferos para cada tramo individual. Los valores obtenidos resultaron ser como sigue:

Tramo Comaquito - Imuris; 128 millones de m³, espesor medio saturado, 16.4 m.

Tramo Imuris - San Ignacio; 158 millones de m³, espesor medio saturado, 16.7 m.

Tramo San Ignacio - Magdalena; 156.7 millones de m³, espesor medio saturado, 14.5 m.

Tramo Magdalena – La Galera; 149.6 millones de m³, espesor medio saturado, 5.9 m.

Tramo La Galera - El Sifón; 438.6 millones de m³, espesor medio saturado, 11.1 m.

Tramo El Sifón - El Claro; 94.4 millones de m³, espesor medio saturado, 5.6 m.

5.2 Parámetros hidráulicos

Con el objeto de complementar el conocimiento de las características de transmisividad y almacenamiento del acuífero Magdalena, en el estudio realizado en 1975 por la compañía Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados se efectuaron 12 pruebas de bombeo, obteniéndose los siguientes resultados: La transmisividad varía de 0.44 a $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-2} \times \text{s}$. El coeficiente de almacenamiento fue de 49.1×10^{-4} a 3300×10^{-4} algunas pruebas contaron con pruebas de observación.

5.3 Piezometría

En este acuífero se tiene información piezométrica que fue tomada durante el período de realización de los estudios anteriormente señalados que fueron en 1975, 1976 y 1981. Por las características del acuífero puede considerarse una cierta estabilidad en el comportamiento de los mismos.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad de los niveles estáticos, es de gran utilidad, pues define áreas de descarga por evapotranspiración; proporciona una idea de la profundidad mínima que deben tener los pozos, y permite seleccionar áreas apropiadas para la explotación, desde el punto de vista de costos de bombeo.

La profundidad a la que se encuentran los niveles estáticos en 1976 varía entre 1.4 y 55 metros, aumentando gradualmente desde la confluencia de los ríos Altar y Magdalena hacia los bordes norte y oriental de la zona.

Para tener una idea aproximada de la profundidad a que se encontraban los niveles estáticos en condiciones naturales, se investigó en la jefatura del Distrito de Riego No.37, el nivel estático original de los pozos más antiguos; este nivel corresponde al de la fecha de perforación de esos pozos.

Los datos obtenidos corresponden a un intervalo de tiempo, comprendido entre el año de 1948 y el año de 1954. Con base en estos datos, se elaboraron planos, en los que puede apreciarse que en ese intervalo de tiempo la profundidad a los niveles estáticos variaba entre 10 y 55 metros, aumentando gradualmente en el sentido contrario del cauce del río Magdalena y del cauce de este mismo río hacia los bordes norte y oriental del valle. Las profundidades menores (entre 10 y 20 metros) se encontraban al occidente, en las cercanías de la confluencia del Río Altar con el río Magdalena. Las profundidades mayores, entre 40 y 55 metros, se encontraban en las partes altas, al oriente y norte de la zona.

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con apoyo en los datos de niveles del agua referidos al nivel del mar, se trazaron curvas de igual elevación del nivel estático. Las configuraciones así obtenidas permiten inferir las direcciones del flujo subterráneo: en el subsuelo el agua sigue trayectorias normales a las curvas de igual elevación del nivel estático y en el sentido en que decrece la carga hidráulica. Para los años de 1966, 1970, 1971, 1972 y 1976, se trazaron curvas de igual elevación del nivel estático, obteniéndose una gran similitud entre estas configuraciones que muestran, desde 1966, prácticamente el mismo esquema de flujo subterráneo.

Por esta razón, en este informe sólo se presentan las configuraciones correspondientes al inicio y al final del período de observaciones del nivel estático. Además, con el propósito de obtener un esquema de flujo subterráneo representativo de las condiciones naturales, es decir, las que existían antes de que se iniciara la explotación intensiva de los acuíferos, se infirió una configuración de curvas de elevación del nivel del agua, con apoyo en los datos de niveles estáticos de los pozos perforados en los años de 1948 a 1954.

En ese tiempo la dirección predominante del flujo subterráneo era de oriente a poniente; las elevaciones del nivel estático aumentaban gradualmente desde unos 310 metros sobre el nivel del mar en las inmediaciones de la población de Pitiquito, Son., hasta unos 360 metros sobre el mismo nivel en el límite oriental del Distrito de Riego No. 37 Altar-Pitiquito-Caborca; el gradiente medio del flujo era de 1.7 al millar.

En esta configuración, todavía no se reflejan los efectos de una explotación intensiva, por lo que, en términos generales este comportamiento puede proporcionar una idea aproximada de la elevación del nivel estático en condiciones naturales.

La configuración de elevación del nivel estático correspondiente al inicio de las observaciones en el año de 1966, refleja la dirección dominante del flujo subterráneo era todavía en general de este a oeste pero con algunas excepciones locales, debidas a efectos causados por el bombeo.

Las elevaciones del nivel estático variaban entre 860 en la zona del Comaquito hasta 610 en la zona de El Claro y 355 msnm en la zona de Llano Blanco con un gradiente medio de flujo de 2.2 a 4.0 al millar.

En las porciones central y occidental de la zona, se formaron conos de abatimientos con elevaciones mínimas de 325 y 306 msnm, respectivamente la explotación había interceptado ya la totalidad de la recarga natural, iniciándose desde esa fecha o un poco antes la sobreexplotación del acuífero.

En la configuración de niveles estáticos en octubre de 1976. El esquema del flujo subterráneo es esencialmente el mismo que el mostrado en la configuración anterior, con la diferencia de que las elevaciones de los niveles son notablemente menores, ahora varía entre 300 y 350 msnm, con un gradiente medio de flujo de 2.4 al millar. En la porción central de la zona, los conos de abatimientos se han profundizado y extendido lateralmente; las elevaciones mínimas son ahora de 323 y 321 msnm y en la porción occidental las elevaciones del nivel del agua son ahora de 300 metros sobre el nivel del mar.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Hidrógrafos de Pozos El comportamiento de niveles de agua observados en 31 pozos distribuidos en la zona estudiada corresponden al intervalo 1966 a 1976.

Puesto que estas observaciones fueron realizadas con frecuencia anual, los hidrógrafos no muestran el comportamiento estacional de los niveles de agua pero sí reflejan claramente los efectos de la sobreexplotación.

La mayoría de los pozos observados, muestran un descenso progresivo del nivel; la velocidad de abatimiento depende de la ubicación del pozo, siendo hasta de 1 metro por año en los pozos localizados en las áreas de mayor concentración del bombeo y de más o menos 30 centímetros por año en los localizados en la periferia de los mismos.

Los hidrógrafos de los pozos Nos. 885, 892, 896, 899, 924, 931, 935, 936, 97 y 1976 ubicados en la porción central de las áreas de bombeo son los que presentan mayor velocidad de abatimiento. Por otro lado en los pozos 926, 954, 976, 994 y 1001 que se encuentran más alejados de los centros de bombeo, los niveles de agua fluctúan más suavemente.

Los hidrógrafos de los pozos ubicados en las cercanías del cauce del río Magdalena y el borde oriental de la zona, donde tiene lugar la recarga del acuífero por la infiltración de la lluvia, mostraron recuperaciones del nivel entre 0.5 y 1.5 metros, en el año de 1971, lo que indica que en ese año ocurrió una recarga máxima al acuífero, por tratarse de un año con precipitación anormalmente alta; en efecto, la precipitación media anual de la subcuenca de Llano Blanco en el período 1966-1976 fue de 265 mm, mientras que en el año de 1971 la lluvia alcanzó 347 mm de altura de precipitación.

Después de los años 1971 y 1972, los niveles del agua continuaron abatiéndose progresivamente en todos los pozos de la zona.

Del comportamiento del acuífero observado en los hidrógrafos de los pozos y de la disponibilidad y calidad de la información, se definieron los siguientes intervalos de tiempo para plantear el balance de agua subterránea: 1970-1971, 1972-1976 y 1966-1976.

Para ilustrar la evolución de los niveles de agua en el área y calcular los cambios de almacenamiento experimentados por el acuífero, se trazaron curvas de igual evolución del nivel estático para los intervalos de tiempo antes mencionados.

La evolución de los niveles estáticos en el período 1970-1971, en la porción oriental de la zona se presentaron recuperaciones del nivel entre 1 y 2 metros, en el resto del área los niveles del agua se abatieron entre 40 centímetros y 1 metro.

Mediante esa configuración se obtuvo que en toda la superficie estudiada, el acuífero experimento un abatimiento medio de 21 centímetros.

La evolución de los niveles estáticos en el período 1972-1976, en este intervalo de tiempo los niveles estáticos se abatieron entre 1 y 6 metros, presentándose los máximos abatimientos en las porciones central y occidental de la zona, donde el bombeo es más intenso. El abatimiento medio en ese intervalo de tiempo, fue de 2.9 metros en toda la superficie analizada, equivalente a un abatimiento medio anual de 0.81 metros.

La evolución de los niveles del agua en el intervalo 1966 a 1976, refleja claramente los efectos de la sobreexplotación en toda el área. Los abatimientos provocados varían entre 3 y 9 metros. El abatimiento medio en este intervalo de tiempo fue de 6.1 metros; equivalente a un abatimiento medio de 0.61 metros/año en toda la superficie estudiada. En términos generales, el comportamiento de los niveles de agua anteriores, es compatible con la distribución del bombeo y pone de manifiesto la sobreexplotación del acuífero de esta zona.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La hidrogeoquímica es empleada como un auxiliar de la geohidrología y tiene dos aplicaciones prácticas principales: la primera consiste en ayudar a conocer en forma cualitativa, el funcionamiento de los acuíferos y la segunda en poner de manifiesto la calidad del agua de los mismos.

La composición química del agua, está en íntima relación con el funcionamiento general del acuífero, ya que la concentración, tanto de sales totales como de cada elemento, dependen del tipo de material, a través del cual circula; de la permeabilidad y porosidad del medio, del tiempo de contacto entre el agua y las rocas y de la longitud de recorrido, entre otros factores.

Es por ello que a partir de su composición, es posible conocer, en forma aproximada, la dirección del flujo subterráneo, la ubicación de las zonas de recarga y en forma cualitativa, algunas características físicas del acuífero.

Por otra parte, con los análisis químicos se puede deducir la calidad del agua para usos agrícolas, ganaderos, agropecuarios, potables, turísticos e industriales.

Los sólidos totales disueltos en el agua subterránea de esta zona, varían de 194 a 1280 partes por millón (ppm), con un promedio para todas las muestras de 498 ppm.

Se graficó la conductividad eléctrica contra los sólidos totales con el objeto de corregir los valores de sólidos totales disueltos, que posteriormente fueron utilizados en la elaboración de la configuración. En esta configuración, se observa que los valores más bajos, se localizan al este del área, indicando que esta región constituye, probablemente, la principal zona de recarga del acuífero. En general, las sales en solución, van aumentando hacia el noroeste, mostrando un flujo del agua hacia esta dirección.

La distribución espacial de los sólidos disueltos es irregular y las causas de ello se comentan a continuación:

En la parte central del área, se tiene una zona en donde disminuyen los valores a menos de 400 ppm, debido a una entrada lateral de agua que contiene concentraciones bajas de sales y que al mezclarse con la propia del acuífero la diluye. Hacia el noroeste, la cantidad de sales en solución vuelve a incrementarse, dando lugar a la formación de domos con valores altos en sus partes centrales. La primera zona se encuentra en las inmediaciones del poblado de Llano Blanco, donde se delineó la curva cerrada de 500 ppm y la segunda en el extremo noroeste donde se forma un domo con valores de hasta 1,200 ppm.

Lo anterior, es originado por la intensiva extracción de agua subterránea que es usada en riego en estas zonas, provocándose la acumulación de sales en los suelos y en consecuencia en el agua subterránea.

A lo largo del Río Magdalena, existe una zona donde el agua subterránea tiene los contenidos de sales más bajos, debido a la presencia de materiales fluviales con mayor permeabilidad.

Alejándose de esta zona, los materiales aluviales contienen mayor cantidad de sedimentos argiláceos, lo que origina una disminución en la permeabilidad de los mismos, por lo que la región inmediata al Río, constituye una zona preferente de flujo del agua subterránea, donde al circular con mayor velocidad, el tiempo de contacto agua-roca disminuye y por tanto, la disolución de sales también.

En cuanto a la evolución de Sólidos Totales Disueltos 1973-1976, los pozos de la Zona de Llano Blanco, han sido muestreados y analizados químicamente durante cinco ocasiones, desde 1973 hasta 1976.

Los sólidos totales disueltos determinados en algunos de ellos, durante los cinco muestreos, así como el valor de la evolución encontrada del primer muestreo en Agosto de 1973, al más reciente de Julio de 1976. En dicha tabla, se observa que no ha existido un cambio uniforme de la concentración de sales en el agua con respecto al tiempo, o sea, que las condiciones hidrogeoquímicas en los últimos tres años han permanecido en equilibrio.

Diagramas Triangulares

A partir de las concentraciones en miliequivalentes por litro, de los principales iones determinados en los análisis químicos, se clasificó el agua por método de diagramas triangulares.

Las muestras correspondientes a esta zona, se graficaron en tres diagramas. En ellas se observa que el agua es mixta y mixta sódica bicarbonatada, debido a que los principales minerales que disuelve, son feldespatos que forman las gravas producidas por la erosión y el intemperismo de las rocas ígneas y metamórficas que afloran en los bordes del valle.

Con el tipo de análisis efectuados, es factible dictaminar sobre la calidad química del agua y a partir de ello, elaborar recomendaciones respecto a su uso.

Respecto a los índices analizados, estos en general cumplen con los requisitos establecidos, a excepción de los pozos 902, 903 y 906, los cuales contienen 1,239, 1,280 y 1,024 ppm de sólidos totales disueltos, respectivamente, así como el pozo 987 que tiene 1,444 ppm, pero se cree no sea representativo y su concentración se deba a las condiciones locales o posiblemente a un error de muestreo y/o laboratorio.

Con respecto a los bicarbonatos, en algunos casos se encuentran sobrepasando la norma de calidad, aunque en términos generales el agua es de muy buena calidad para uso potable. Se calculó la relación de adsorción de sodio y se midió la conductividad eléctrica, basándose en lo cual se obtuvo la clase de agua para riego, por el método de Wilcox.

De las 49 muestras analizadas, 28 pertenecen a la clase C2-S1, 20 a la clase C3-S1 y una muestra a la clase C4-S1, de lo cual se deduce que el agua es en general de buena calidad y apropiada para utilizarse en riego y sólo en algunos casos deben tomarse precauciones en su manejo.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Durante el estudio efectuado en 1974 se censaron un total de 727 aprovechamientos de los cuales 39 son pozos, 684 norias, 2 tajos y 2 manantiales. La mayoría de los pozos son para uso agrícola y las norias para uso doméstico.

La capacidad instalada de extracción fue de 4189 lps disminuyendo a 3923 en el año de 1975 que se desglosan como sigue: para el tramo Comaquito-Imuris fue de 187 lps; para el tramo Imuris-San Ignacio fue de 424 lps; en el tramo San Ignacio-Magdalena de 1084 lps, entre Magdalena y Santa Ana de 830 lps y de Santa Ana a El Claro de 1394 lps.

Actualmente y de acuerdo con información proporcionada por la Subgerencia de Administración del Agua a través del REPDA se tiene un total de 1017 aprovechamientos con un volumen concesionado de 41,661,605.10 metros cúbicos entre todos los usos, desglosados como se muestra en la tabla 2, y en la tabla 3 se muestra el volumen de extracción considerado para el balance.

Tabla 2. Aprovechamientos con volumen concesionado

Usos	No. Aprovechamientos	Volumen (m3)
Agrícola	352	27'251,445.40
Agroindustrial	-	-
Doméstico	159	60,008.25
Industrial	5	385,900.00
Múltiples	114	1'208,587.00
Pecuario	235	283,478.45
Público Urbano	145	12'451,566.00
Servicios	7	20,600.00
Total	1017	41'661,605.10

Tabla 3. Volumen de extracción considerado en el balance

No. aprovechamientos	Volumen (m3)
1017	41'661,605.10

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

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

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

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

Del análisis realizado, se concluye que en el acuífero Magdalena entre el tramo desde Comaquito hasta El Claro se presenta una recarga total de 41.3 millones de m³, 37.5 hm³ anuales, comprendida por la infiltración de lluvia y riego, y 3.8 millones de m³ son por flujo subterráneo.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Se consideran **37.5 millones de m³** de recarga vertical provenientes de la parte alta de la cuenca y en los bordes laterales, que comprende la infiltración de lluvia y riego.

7.1.2 Recarga inducida (Ri)

Este valor de la recarga inducida está incluida en el retorno del riego que se efectúa mediante la aplicación de 21.7 millones de m³ obtenidos mediante pozos y una derivación de 18.5 millones de m³ de las obras de toma provenientes del río Bambuto y del arroyo Agua Zarca.

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Se consideró un volumen de **3.8 millones de m³** que corresponden a las entradas por flujo subterráneo.

7.2 Salidas

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

En los análisis para la determinación de los volúmenes de la recarga y descargas, los estudios no tomaron en cuenta los valores de esta componente, probablemente debido a que en el área de Balance, la vegetación sólo es importante en la rivera del Río.

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

El bombeo es la componente más importante de las salidas del acuífero. En los análisis se consideró un volumen de extracción por pozos del orden de **25 millones de m³** anuales con los aprovechamientos descritos en el apartado No 6 del presente documento.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas por flujo subterráneo se calcularon en un volumen de **8.7 millones de m³** que fluyen hacia el acuífero del valle de Caborca, con el cual existe una estrecha intercomunicación, principalmente hacia la zona de Llano Blanco, mencionada en este informe.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

El cambio de Almacenamiento anual obtenido del presente análisis fue de **7.6 millones de m³**, en el período del estudio que fue de un año. Este valor se considera muy dinámico, ya que dadas las características del acuífero (contenido en materiales granulares de escasa profundidad), en épocas de lluvia, el cambio de almacenamiento se vuelve positivo.

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **41.3 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 = 0.0 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **51,443,564 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 41.3 - 0.0 - 51.443564 \\ \text{DMA} &= -10.143564 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **10,143,564 m³ anuales**.