



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VILLA HIDALGO (2652), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica.....	5
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural	14
4.3 Geología del subsuelo.....	15
5. HIDROGEOLOGÍA.....	16
5.1 Tipo de acuífero.....	16
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría.....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	23
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	24
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2 Salidas	27
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	27
7.2.2 Descargas naturales por manantiales (Dm)	28
7.2.3 Extracción por bombeo (B).....	28
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	28
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	29
8. DISPONIBILIDAD	30
8.1 Recarga total media anual (R).....	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	31
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA	32

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Villa Hidalgo, definido con la clave 2652 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 30° 05' y 30° 52' de latitud, y 109° 10' y 109° 35' de longitud, cubriendo una superficie de 2943 km². Limita al norte con el acuífero Batevito, al noroeste con el acuífero Río Frontera, al oeste con el acuífero Cumpas, al este con el acuífero Río Bavispe y al sur con el acuífero Huásabas (figura 1).

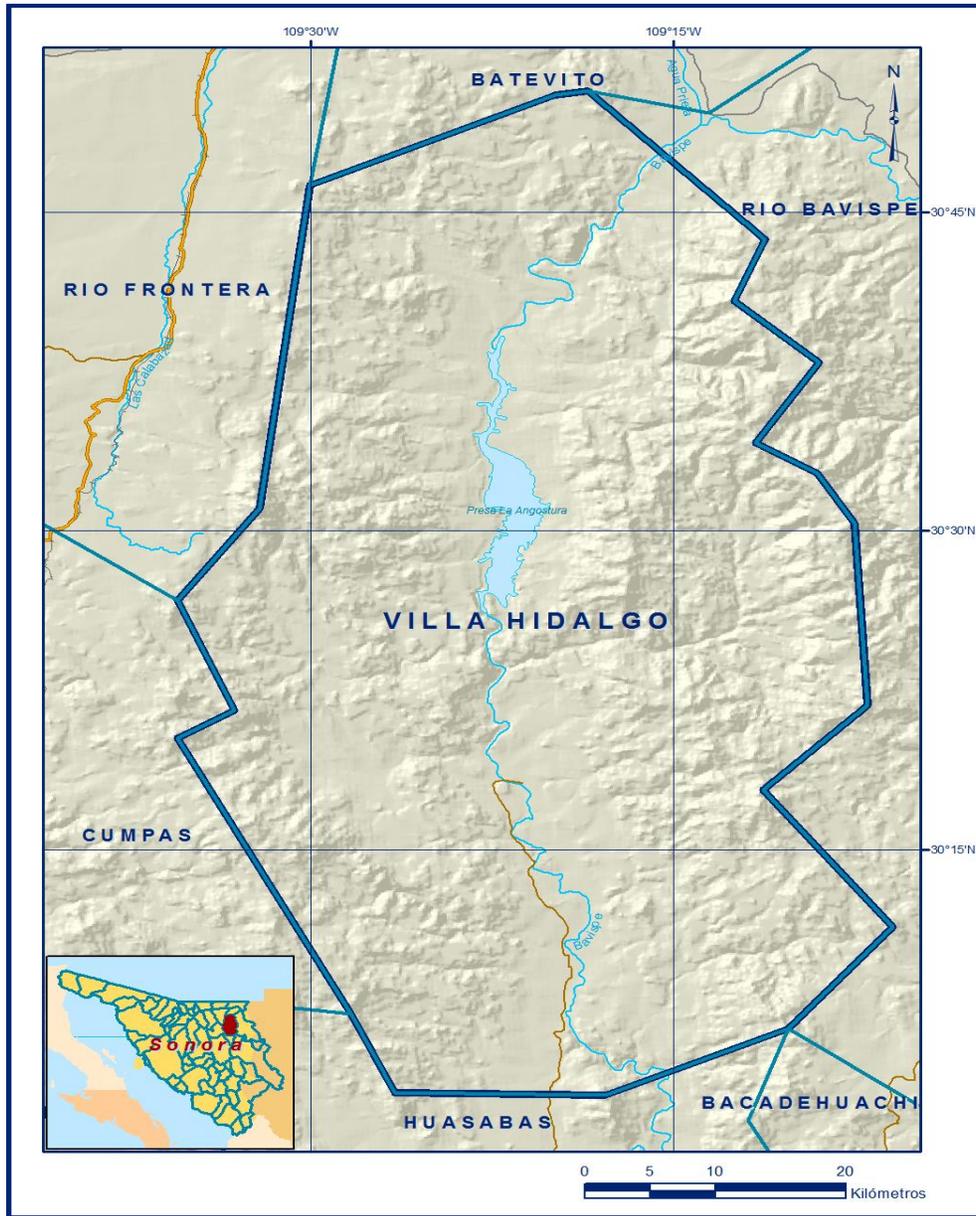


Figura 1. Localización del Acuífero Villa Hidalgo

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Villa Hidalgo y Nacozari de García principalmente y en menor proporción abarca parte de los municipios: Fronteras, Bavispe, Agua Prieta, Bacerac, Huachinera y Huásabas. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Coordenadas que definen al área del Acuífero Villa Hidalgo

ACUIFERO 2652 VILLA HIDALGO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	109	11	13.3	30	43	42.4
2	109	12	29.1	30	40	47.4
3	109	8	58.2	30	37	54.3
4	109	11	35.7	30	34	6.8
5	109	9	2.1	30	32	42.2
6	109	7	30.6	30	30	19.4
7	109	6	58.3	30	21	45.3
8	109	11	17.9	30	17	47.2
9	109	5	54.4	30	11	20.0
10	109	10	14.7	30	6	33.8
11	109	17	48.5	30	3	26.3
12	109	26	32.8	30	3	33.7
13	109	28	20.3	30	7	16.3
14	109	35	32.2	30	20	13.9
15	109	33	11.3	30	21	31.7
16	109	35	32.2	30	26	42.0
17	109	32	7.8	30	31	2.9
18	109	30	18	30	46	13.6
19	109	19	54.6	30	50	30.1
20	109	13	33.3	30	50	40.4
1	109	11	13.3	30	43	42.4

1.2. Situación administrativa del acuífero

El Acuífero Villa Hidalgo pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y se encuentra sujeto a las disposiciones del “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, extracción y aprovechamiento de las Aguas del Subsuelo en la parte que corresponde a diversos Municipios del Estado de Sonora”, publicado en el DOF el 24 de septiembre de 1984. Clasificado como veda tipo II que indica que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

La porción centro sur, que comprende los municipios Villa Hidalgo, Bacerac, Huachinera y Huásabas, no se encuentra regido por ningún decreto de veda para aguas subterránea.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

Aunque el volumen de extracción es incipiente, los usos principales son el público-urbano y el agrícola. 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

No existen estudios de evaluación geohidrológica realizados en la superficie que cubre el acuífero, ni en la región, ya que se trata de acuíferos intermontanos en los que la extracción del agua subterránea es incipiente y donde no existe competencia por su uso. El único realizado es con fines de exploración minera.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA. Elaborado por el Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, 2008.

Este estudio realiza una evaluación preliminar de algunos acuíferos serranos del estado de Sonora, entre ellos Villa Hidalgo, incluyendo actividades de campo para el planteamiento del balance de aguas subterráneas: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y pruebas de bombeo. 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

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas propuesta por E. Raisz (1964), el área que comprende el acuífero Villa Hidalgo se encuentra ubicada dentro de dos provincias: Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte. En el caso de la Provincia Sierra Madre se divide en dos subprovincias: Sierras y Valles del Norte y Sierras y Cañadas del Norte.

La primera subprovincia está formada principalmente por sierras altas entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación preferente norte-sur, tal es el caso de las sierras La Juriquipa, La Sandía y El Pinito, mientras que la segunda subprovincia se caracteriza por sierras de laderas escarpadas, entre las cuales se localizan valles intermontanos, constituidas principalmente por rocas volcánicas ácidas y grandes franjas basálticas orientadas norte-sur, dentro de las cuales se encuentran las sierras Pilares de Teras, El Tigre, Las Iglesias, El Baraino, La Rastrita y El Capulín.

Por otro lado, la Provincia Sierras y Llanuras del Norte sólo abarca una parte del área que corresponde en particular a zonas de la subprovincia Llanuras y Médanos del Norte, la cual a su vez está formada por extensos valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras, tales como las mesas El Reparó, Los Paredones, Loma Las Lobera y el valle La Isla.

En la zona predominan cuatro fisiotipos:

I-1-V2 Valle aluvial intermontano: Se presenta en los extremos noroeste y noreste de la zona, cubriendo una escasa porción del acuífero. Se trata de pequeños valles de reducido espesor rellenos de material aluvial.

II-7-S1 Sierra Alta: Forma el extremo occidente del acuífero, por su litología opera como una barrera hidráulica que separa a los acuíferos Villa Hidalgo y Cumpas.

III-8-S1V Sierra Alta Con Cañadas: Se ubica en el límite oriental del acuífero, formando una serie de sierras con orientación preferente norte-sur.

Funciona como barrera hidráulica entre los acuíferos Villa Hidalgo y Río Bavispe.

IV-7-V3 Valle intermontano: Se trata de una zona de valle, donde se alojan sedimentos recientes que forman el acuífero donde actualmente se extrae el agua subterránea. El valle está flanqueado por dos sierras orientadas preferentemente de norte a sur.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de INEGI (2003), en el acuífero se pueden diferenciar cinco tipos de climas, de los cuales a continuación se hace una breve descripción en orden de importancia.

BS1k(x'), (Semiárido, templado). Su temperatura media anual varía entre 12 y 18° C, con una temperatura del mes más frío entre -3 y 18° C, temperatura del mes más cálido menor de 22° C. Presenta lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

BSoh(x'), (Árido, semicálido). Su temperatura media anual varía entre 18 y 22° C, con una temperatura del mes más frío menor de 18° C, mientras que la temperatura del mes más cálido es mayor de 22° C.

Registra lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

BS1h(x'), (Semiárido, semicálido). Su temperatura media anual es mayor de 18° C, la temperatura del mes más frío menor de 18° C, mientras que la temperatura del mes más cálido es mayor de 22° C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

C(wo)x', (Templado, subhúmedo). Con temperatura media anual entre 12 y 18° C, su temperatura del mes más frío varía entre -3 a 18° C y temperatura del mes más cálido menor de 22° C. La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

BSok(x'), (Árido, templado). Presenta temperatura entre 12 y 18° C, la del mes más frío entre -3 y 18° C, y la del mes más cálido es menor de 22° C. Registra lluvias a lo largo de todo el año y su porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

El análisis climatológico se realizó con la información de cinco estaciones con influencia en el área, tres de ellas: Colonia Morelos, Huásabas y Granados, se ubican fuera de los límites del acuífero.

Las dos restantes, Villa Hidalgo y La Angostura, se localizan dentro de la poligonal del acuífero. Las estaciones ubicadas dentro del acuífero carecen de datos suficientes y representativos, por lo anterior se involucraron tres estaciones más ubicadas en los alrededores.

La temperatura media anual en la zona es de 25.1° C, la precipitación media anual es de 348.2 mm/año. El valor de evaporación potencial para la zona, de acuerdo con datos obtenidos de las estaciones, es de 2282 mm anuales.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 9, Sonora-Sur (RH-9), dentro de la Cuenca del Río Yaqui, la cual a su vez está delimitada por dos subcuencas: Río Bavispe y Río Bavispe - Presa La Angostura, la primera cubre desde la Presa La Angostura hacia el norte, mientras que la segunda se localiza desde la citada presa hacia al sur (INEGI, 2003).

La corriente principal del acuífero es el Río Bavispe, el cual contiene agua prácticamente todo el año, su escurrimiento está controlado por la Presa Lázaro Cárdenas (La Angostura). Las corrientes secundarias superficiales son efímeras y estacionales, los principales arroyos afluentes del Río Bavispe son: Cruz de Cañada, Agua Caliente, El Manchón de Alisos, El Sauz, El Basto, La Junta, El Safo, Los Otates, El Tigre, El Durazno, entre otros.

A nivel regional, el principal colector de la cuenca es el Río Yaqui, que nace de la unión de los ríos Bavispe y Aros, siendo el primero el que atraviesa el acuífero en dirección norte a sur, pasando por las comunidades Huásabas, Granados, Promontorio, Batacomachi, entre otras, hasta desembocar en la Presa Plutarco Elías Calles (El Novillo).

La principal obra hidráulica en el acuífero es la Presa Lázaro Cárdenas (La Angostura), ubicada sobre el Río Bavispe, con una capacidad total de almacenamiento de 1,118 hm³, ubicada a 30 km al norte de Villa Hidalgo. El uso principal de la presa es almacenamiento de agua para riego agrícola (fuera de los límites del acuífero), así como la generación de energía eléctrica.

Al noroeste de Villa Hidalgo a una distancia aproximada de 18 km se localiza la presa de depósito de jales de la Mina La Caridad, construida en 1984 con una capacidad cercana a los 500 hm³.

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 9, Sonora-Sur (RH-9), dentro de la Cuenca del Río Yaqui, la cual a su vez está delimitada por dos subcuencas: Río Bavispe y Río Bavispe - Presa La Angostura, la primera cubre desde la Presa La Angostura hacia el norte, mientras que la segunda se localiza desde la citada presa hacia al sur (INEGI, 2003).

La corriente principal del acuífero es el Río Bavispe, el cual contiene agua prácticamente todo el año, su escurrimiento está controlado por la Presa Lázaro Cárdenas (La Angostura).

Las corrientes secundarias superficiales son efímeras y estacionales, los principales arroyos afluentes del Río Bavispe son: Cruz de Cañada, Agua Caliente, El Manchón de Alisos, El Sauz, El Basto, La Junta, El Safo, Los Otates, El Tigre, El Durazno, entre otros.

A nivel regional, el principal colector de la cuenca es el Río Yaqui, que nace de la unión de los ríos Bavispe y Aros, siendo el primero el que atraviesa el acuífero en dirección norte a sur, pasando por las comunidades Huásabas, Granados, Promontorio, Batacomachi, entre otras, hasta desembocar en la Presa Plutarco Elías Calles (El Novillo).

La principal obra hidráulica en el acuífero es la Presa Lázaro Cárdenas (La Angostura), ubicada sobre el Río Bavispe, con una capacidad total de almacenamiento de 1,118 hm³, ubicada a 30 km al norte de Villa Hidalgo. El uso principal de la presa es almacenamiento de agua para riego agrícola (fuera de los límites del acuífero), así como la generación de energía eléctrica.

Al noroeste de Villa Hidalgo a una distancia aproximada de 18 km se localiza la presa de depósito de jales de la Mina La Caridad, construida en 1984 con una capacidad cercana a los 500 hm³.

3.4 Geomorfología

En conjunto se aprecian tres rasgos geomorfológicos definidos, cuyas expresiones son: Macizo Montañoso: formado por las sierras ubicadas al oriente de la zona: Pilares Teras (2200 msnm), Las Delicias (2200 msnm), El Tigre (2200 msnm), Las Iglesias (1900 msnm), El Baraino (1700 msnm), La Rastrita (1300 msnm), El Capulín (1900 msnm). Presentan una orientación preferente norte sur, con un decremento de altura hacia el sur del área. Al poniente se ubican las sierras El Pinito (1800 msnm) La Juriquipa (1700 msnm) y La Sandía (1200 msnm), con alturas menores a las sierras del flanco oriental; están constituidas principalmente por rocas ígneas extrusivas: tobas riolíticas, ignimbritas, tobas andesíticas.

Mesetas y Terrazas: Se localizan al norte y noroeste del acuífero, en forma plana y escalonada, formadas por depósitos conglomeráticos y arenas, tal es el caso de las mesetas El Repaso y Los Paredones (ubicadas al norte), La Planilla, Bonita, El Bajío de Los Quemados y La Lomas La Lobera (localizadas al noroeste).

Valle Intermontano: Su característica principal es la pendiente suave hacia el cauce del Río Bavispe, está orientado con una dirección preferente norte-sur, formado por depósitos fluviales y lacustres con rocas volcánicas, así como por material granular no consolidado, del tamaño de arenas y limos.

El drenaje que predomina en la zona es de tipo subparalelo y en algunas regiones el tipo rectangular, el cual es característico de zonas donde predominan rocas ígneas extrusivas.

4. GEOLOGÍA

La zona donde se ubica el acuífero Villa Hidalgo presenta una gran variedad de unidades litológicas, rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, que representan un registro estratigráfico del Precámbrico hasta el Reciente (figura 2).

Las unidades recientes están representadas por depósitos conglomeráticos y aluviales alojados principalmente en zona de valles, mientras que las rocas más antiguas son pequeños afloramientos aislados del Granito Las Mesteñas, de edad 1,440 ma, en la Sierra El Tigre

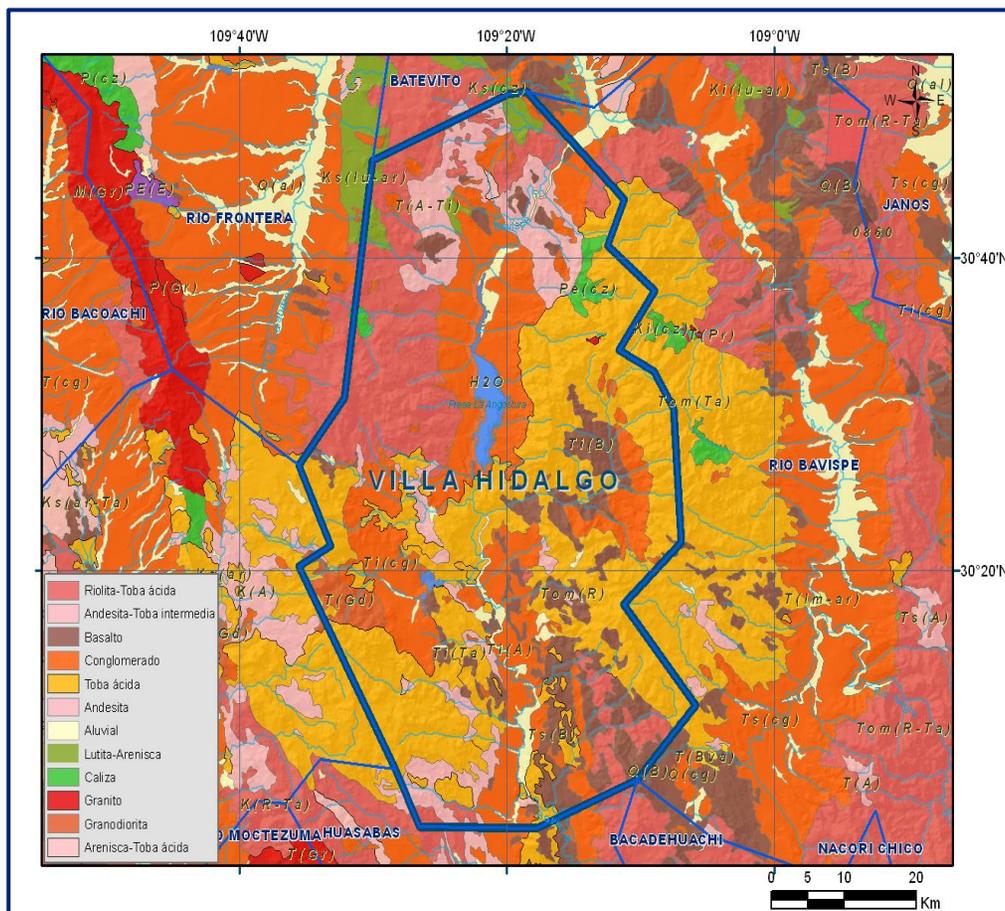


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades litológicas, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente. Proterozoico medio, “Granito Las Mesteñas” (pTmGr-Gd). Unidad representada por un cuerpo ígneo intrusivo de naturaleza granítica que aflora en la Sierra El Tigre, ubicada al noroeste del acuífero. Desde el punto de vista geohidrológico, por su carácter impermeable esta unidad funciona como basamento hidrogeológico.

Paleozoico superior, “Unidad Indiferenciada” (Pdp Cz-Ar). Está representada por rocas sedimentarias marinas, principalmente de plataforma, compuestas por calizas masivas, areniscas, y lutitas, con abundante contenido fosilífero de braquiópodos, y fusilínidos. En la zona aflora en la Sierra El Tigre, así como al este de la comunidad Pilares de Teras. Desde el punto de vista geohidrológico esta secuencia se caracteriza por tener una permeabilidad media debido a su fracturamiento y disolución a los que puedan estar sometidas las calizas. Constituye una zona de recarga limitada debido a que sus afloramientos son escasos y de reducidas dimensiones.

Cretácico Inferior, “Formación Caliza Mural” (Ka Cz-Lu). Se trata de una formación que pertenece al Grupo Bisbee y que aflora en la sierra Pilares de Teras. Litológicamente se encuentra compuesta por calizas y areniscas dispuestas en estratos delgados, con abundantes ostreas e intercaladas con limolitas calcáreas y lodolitas; su espesor aproximado es de 100 a 160 metros. La parte superior está constituida por capas gruesas de calizas fosilíferas de 50 a 80 m de espesor, con abundantes fragmentos de moluscos, corales, rudistas y orbitolinas.

Estratigráficamente sobreyace discordantemente a rocas paleozoicas y subyace de la misma manera discordante a rocas riolíticas y tobas del Terciario. Por sus componentes de grano fino, esta unidad presenta permeabilidad baja, aunque sus horizontes arenosos presentan permeabilidad media.

Cretácico Superior, “Grupo Cabullona” (KsAr-Cgp). Es una potente secuencia de rocas detríticas con cantidades pequeñas de ceniza volcánica que descansan discordantemente sobre rocas del Cretácico Inferior. Consiste básicamente de areniscas, lutitas, limolitas y en menor proporción horizontes y lentes conglomeráticos de color gris, verde, café y morado, ocasionalmente intercalados con tobas riolíticas de color gris-morado y más raramente niveles de flujos lávicos de composición intermedia.

Las areniscas están dispuestas en estratos delgados a medios, muestran estratificación cruzada y alto contenido fosilífero (gasterópodos, pelecípodos, etc.). Esta unidad aflora al suroeste de la Sierra Pilares de Teras y al noroeste de la zona, específicamente en los alrededores de los ranchos El Álamo y La Junta. Se ha estimado un espesor total de aproximadamente 2,500 m.

Dado su espesor y amplia variación litológica, tiene comportamientos variables, presentando permeabilidades que varían de alta a baja, lo cual permite a la unidad operar como pequeños acuíferos, zonas de frontera, así como barreras de flujo subterráneo, en función de su permeabilidad.

Cretácico Superior-Paleógeno (Ks TpgA-TA). Unidad no definida formalmente, compuesta por una secuencia de rocas volcánicas: riolitas, tobas riolíticas, andesitas, aglomerados y tobas andesíticas cuya edad varía del Cretácico Superior al Paleógeno. La unidad es característica de un arco magmático cuyos afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos en el área, abundando en la zona centro sur del acuífero. Cabe mencionar que la unidad generalmente se encuentra cubierta por la secuencia volcánica de la Sierra Madre Occidental.

Se observa fuertemente alterada, así como afectada por diversos procesos estructurales que le han conferido una permeabilidad media debido a su fracturamiento moderado, cuando las fracturas están comunicadas entre sí y no se encuentran rellenas por materiales secundarios, constituyendo zonas de recarga al acuífero. Localmente puede constituir acuíferos de bajo rendimiento.

Cretácico Superior, "Batolito Laramide" (KsTpg Gr-Gd). Se trata de todos los cuerpos intrusivos cretácicos de composición granítico – granodiorítica, asociados con la transgresión del arco magmático de la costa hacia el interior del continente durante el Cretácico Tardío al Eoceno Tardío (90 a 40 ma). El cuerpo batolítico incluye todas las intrusiones calcoalcalinas y granitos de micas.

La forma y distribución de sus afloramientos están controlados por la erosión y por los eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la tectónica de extensión del Terciario Medio Tardío. En el área los principales afloramientos se encuentran en la porción suroeste, así como en las sierras La Juriquipa y La Madera. Hidrogeológicamente opera como basamento hidrogeológico.

Cretácico Superior - Neógeno, “Pórfido monzonítico” (Ks Tpg PMz). En la última etapa de emplazamiento se produjo la intrusión de cuerpos hipabisales de tipo porfídico, cuya composición varía de monzonítica a cuarzomonzonítica. Esta unidad se encuentra discordantemente cubierta por la secuencia de rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno y no se observó en campo a la roca que intrusión. Su presencia en la zona es reducida y puntual: al sur del Rancho El Nogal del Carrizo, en el Puerto Chino, al noreste de Santo Domingo y en las inmediaciones del Rancho La Hidra. Dada su escasa presencia, baja permeabilidad y tendencia a formar bloques compactos, carece de importancia geohidrológica.

Paleógeno-Oligoceno, “Sierra Madre Occidental” (ToA-TTq, ToR-TR, ToR-Ig, ToB). Unidad de potente espesor, caracterizada por la abundante presencia de riolitas, ignimbritas, basaltos, andesitas, traquitas, tobas de diversa composición y conglomerados de edad Oligoceno (Cocheme, 1985). Que ha sido nombrada como el “Upper Volcanic Supergroup” por McDowell (1978); en la zona tiende a formar grandes mesetas en las sierras El Tigre y El Pinito.

Esta secuencia volcánica está relacionada con las etapas finales de un largo período de subducción en el noroeste de México, sus espesores son variables. Montaña (1988) asigna un espesor de 540 m en la sierra El tigre, sin embargo se reportan hasta 1600 m en los alrededores de la comunidad Yécora. Es la unidad más ampliamente distribuida en el área. Debido a su amplia distribución y fracturamiento variable, constituye zonas de recarga importantes para el acuífero, cuando es subyacente por la Formación Báucarit es probable que forme acuíferos de bajo rendimiento.

Neógeno, “Formación Báucarit” (TmCgP-Ar, Tm Cgp-B, Tm-B). El Mioceno Medio está representado por la Formación Báucarit (King, 1939); estas rocas representan una sedimentación continental, principalmente de ambientes fluviales y lacustres con rocas volcánicas interestratificadas, producto de la distensión terciaria del Basin and Range.

Está constituida por conglomerados polimícticos y areniscas que en algunos afloramientos se presentan intercaladas con basaltos y andesitas basálticas. Sus afloramientos se encuentran expuestos en los flancos de los valles, principalmente en las inmediaciones del Río Bavispe.

La unidad es de baja permeabilidad a impermeable en casi todos sus afloramientos, sin embargo, localmente puede formar acuíferos de bajo rendimiento.

Pleistoceno, "Conglomerados recientes", Limos, Arenas y Gravas (Qpt Cgp). Durante el Pleistoceno se depositaron nuevos paquetes detríticos de conglomerados polimícticos, arenas y limos que varían de consolidados a poco consolidados, los clastos de los conglomerados están por lo general bien redondeados, corresponden a sedimentos clásticos producto de la erosión de rocas preexistentes que fueron depositados en ambientes continentales, formando terrazas. La unidad de conglomerados recientes aflora al norte en las mesas Los Paredones y El Reparó, así como al noroeste del área, fuera del perímetro del acuífero Villa Hidalgo. Desde el punto de vista geohidrológico es una unidad con potencial acuífero alto, ya que permite la extracción de agua en los valles de acuíferos vecinos.

Aluvión Cuaternario (Qhoal). Se trata de depósitos sedimentarios de gravas, arenas y limos, depositados sobre rocas preexistentes, en forma de abanicos aluviales y fluviales a lo largo del cauce y márgenes del Río Bavispe, así como su planicie de inundación e inmediaciones de arroyos. Se trata de depósitos no consolidados con un espesor que varía entre 20 y 60 m, su permeabilidad varía según los porcentajes de arcilla presente, siendo en general de permeabilidad alta. Cabe mencionar que en esta unidad se ubica la mayoría de los aprovechamientos que extraen agua subterránea en la zona.

4.2 Geología estructural

El comportamiento estructural de la zona es producto de diversos eventos tectónicos como la Orogenia Laramide (Cretácico Tardío - Paleógeno), posteriormente sobrevino un evento distensivo del Neógeno, responsable de la formación de la provincia "Basin and Range", característica del noroeste de México y del suroeste de Estados Unidos. Este episodio se manifiesta por la aparición de juegos de fallas normales y fracturas de distensión en varias direcciones.

Las características estructurales del área consisten en sierras altas alargadas de rumbo preferencial noroeste-sureste. El valle está delimitado por un sistema de fallas normales con dos direcciones preferentes: noroeste – sureste y noreste – suroeste; ambos sistemas son producto de la última etapa tectónica distensiva, iniciada a partir del Paleógeno, la cual dislocó y fragmentó las unidades geológicas presentes, mismas que desarrollaron un complicado panorama estructural de la zona.

En la fosa tectónica que originó el sistema de fallas se depositó el material clástico que conforma el acuífero.

La zona presenta una gran cantidad de fracturas orientadas en sentido noroeste-sureste y noreste-suroeste, que afectan a las rocas volcánicas de las sierras circundantes, las cuales constituyen las zonas de recarga al acuífero.

Otras manifestaciones de eventos tectónicos que afectaron al noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, se manifiestan en la zona a través de discordancias angulares entre las secuencias paleozoicas y mesozoicas, asimismo existe plegamiento cerrado y fallamiento inverso debido a la Orogenia Mesocretácica, mientras la Orogenia Laramide está representada por un sistema de plegamiento y una fuerte presencia de fallas inversas.

4.3 Geología del subsuelo

Con base en las unidades litoestratigráficas reconocidas en campo, es posible definir que el acuífero que actualmente se explota se aloja en un medio aluvial, constituido por gravas, arenas y limos que constituyen el cauce del río Bavispe y arroyos tributarios, y los conglomerados polimícticos que se depositaron hacia los piedemonte de las sierras que limitan el acuífero. La parte inferior del acuífero está alojada en rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

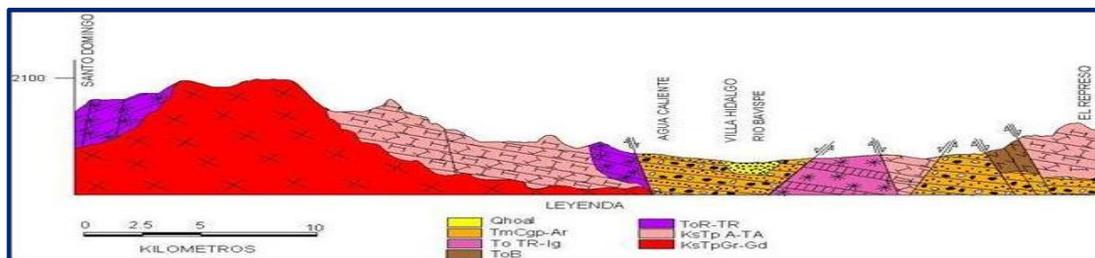
Debido a la falta de información procedente de cortes litológicos de los aprovechamientos, se estimó un espesor de relleno sedimentario (arenas, limos, arcillas) entre 20 y 60 m, donde están ubicados la mayor parte de los aprovechamientos. Bajo este depósito reciente se encuentra el conglomerado consolidado de la Formación Báucarit, el cual opera como barrera (confinante) separando la zona granular de un posible acuífero fracturado en materiales volcánicos (figura 3).

El basamento y las fronteras al flujo subterráneo del acuífero, localmente están constituidos por la Formación Báucarit, Conglomerado Glance que subyace al conglomerado polimíctico del Cuaternario, así como las unidades de baja permeabilidad de la secuencia de areniscas de grano fino y lutitas y a mayor profundidad, los granitos.

Las elevaciones y estructuras que limitan el valle son las que a profundidad constituyen el medio donde tiene lugar el movimiento del agua subterránea.

Subyaciendo a la Formación Báucarit se encuentra una secuencia volcánica fracturada y con presencia de fallas, relacionada con las etapas finales de un largo periodo de subducción que por su amplia distribución en el área representa una unidad de recarga importante, aportando caudales entre 10 y 15 lps. Esta secuencia volcánica se encuentra cubriendo a un paquete de rocas volcánicas extrusivas características de un arco magmático, sus afloramientos se localizan en la parte sur del área.

El acuífero está alojado en un pequeño valle orientado en sentido norte-sur, formado en un graben por dos pilares estructurales (figura 3).



5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento, y por rocas metamórficas y metasedimentarias; así como localmente por rocas intrusivas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento, y por rocas metamórficas y metasedimentarias; así como localmente por rocas intrusivas (figura 3).

5.2 Parámetros hidráulicos

Durante la campaña de censo de aprovechamientos desarrollada en el estudio de 2008 se observó que los aprovechamientos que cuentan con equipos eléctricos y condiciones adecuadas para desarrollar pruebas de bombeo, están fuera de operación o en su defecto no cuentan con orificio para el monitoreo de los niveles del agua. Estas razones impidieron la ejecución de pruebas de bombeo.

Los valores de transmisividad se estimaron con base en la litología que presenta el acuífero. Villanueva (1984), establece que la transmisividad para acuíferos aluviales varía de 100 a 500 m²/día, mientras que para la secuencia de rocas volcánicas fracturadas oscila entre 10 y 100 m²/día.

Para el caso de la transmisividad se considera un valor promedio para el acuífero de **3 x10⁻³ m²/s** (260 m²/día) y conductividad hidráulica de **5.0 x 10⁻⁴ m/s** (8.5 m/día), valores que son consistentes e hidrogeológicamente correlacionables con los obtenidos en el estudio de los acuíferos Huásabas y Cumpas (SGM, 2008).

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas horizontales se definieron con en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado.

Para el caso de las entradas de la zona noroeste se utilizó un valor de 1.73x10⁻⁴ m²/s, para las celdas de la zona occidente un valor de 2.31x10⁻⁴ m²/s, mientras que a la entrada de la zona noroeste se le asignó un valor de 1.15x10⁻⁴ m²/s. Para las celdas se salida se utilizó un valor de 2.31x10⁻³ m²/s, en el caso del acuífero granular, y 1.15x10⁻⁴ m²/s para el medio fracturado.

5.3 Piezometría

De manera paralela al censo de aprovechamientos realizado en julio de 2008, se llevaron a cabo mediciones piezométricas en 17 aprovechamientos, de los cuales 15 corresponden a norias y 2 a pozos.

Las variaciones piezométricas en el acuífero muestran dos tendencias, la mayor parte de los aprovechamientos reflejan el comportamiento del acuífero aluvial, con excepción del pozo ubicado en el Rancho El Destierro, ubicado al noroeste del acuífero, el cual está perforado en material volcánico y aporta un caudal escaso de 2-5 lps.

5.4 Comportamiento hidráulico

Existen cuatro principales zonas de recarga, una ubicada al noroeste donde predominan rocas volcánicas de permeabilidad media, dos zonas más al noreste y occidente, donde el agua circula a través de rocas volcánicas y sedimentarias; por último, existe una zona de recarga en la zona suroeste, donde el agua circula a través de material aluvial.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para 2008 (Figura 5), presenta elevaciones que varían de 600 hasta 1100 msnm. Valores de 950 a 1100 msnm representan las zonas topográficamente más altas, tal es el caso de la zona noroeste del acuífero, donde se ubican los cerros Mesa Los Alisos y Picacho de Valtierra. Elevaciones medias entre 750 y 900 msnm se registran en la zona central del acuífero, mientras que en el extremo sur se registran valores de elevación mínimos, del orden 600 a 680.

De esta manera, se puede identificar que la dirección de flujo subterráneo muestra una trayectoria preferencial norte-sur, con alimentaciones laterales provenientes de las sierras que delimitan el valle.

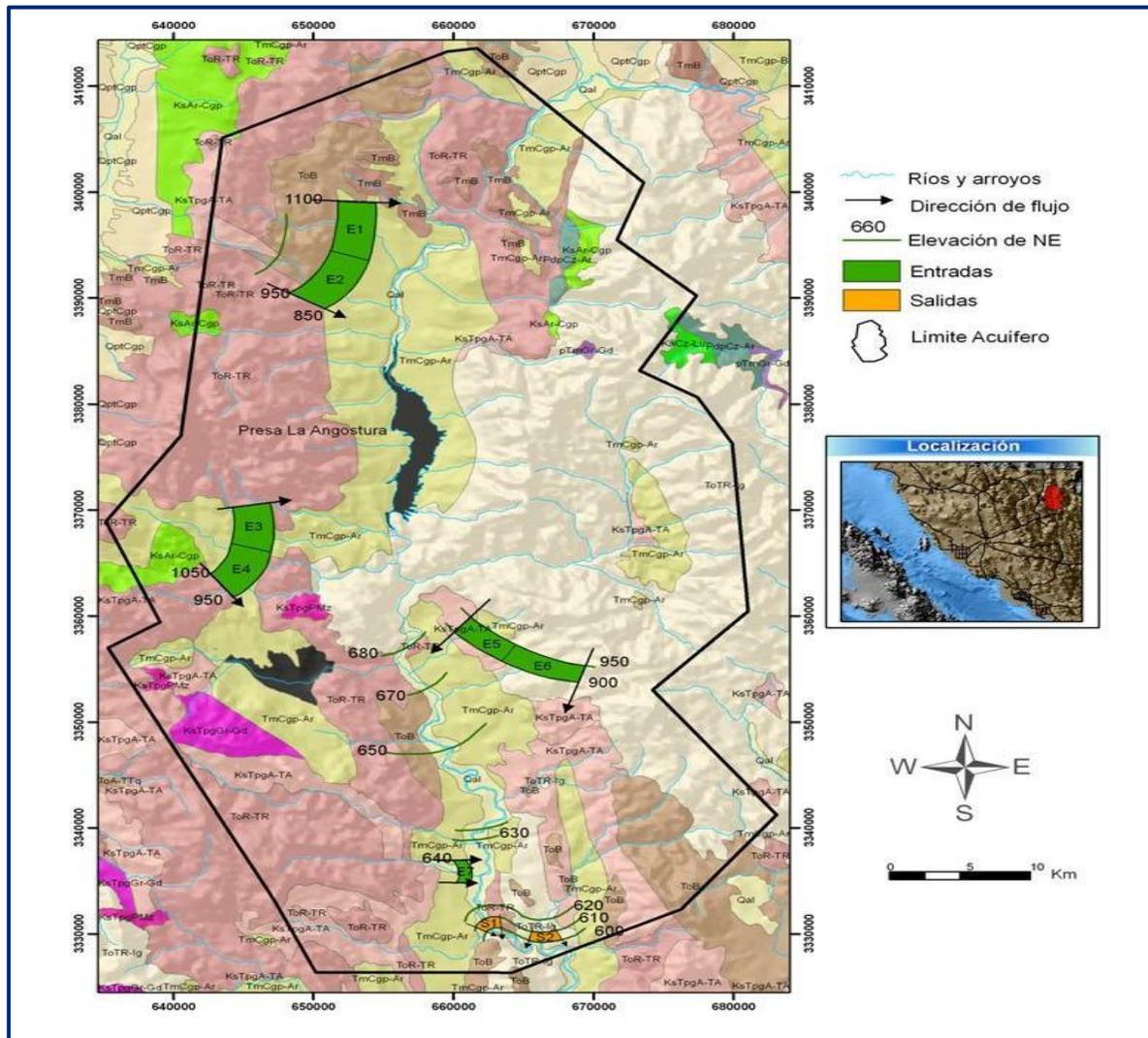


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008) y celdas de flujo

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 se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a ello, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra 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. El volumen de extracción se ha estimado en 0.9 hm³ anuales, valor muy inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse.

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 2008, se tomaron 9 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico respectivo. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, dureza total, nitratos, flúor, metales pesados y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) no superan los 1000 mg/l, excepto el agua de la noria ubicada en el Rancho Cueva de Elías, ubicada al noroeste del acuífero, donde se registró una concentración de 1028 mg/l. Por lo tanto el agua es de buena calidad, apta para el consumo humano y para todo uso. Los demás parámetros físicos y químicos se encuentran dentro de los límites permisibles por la normatividad mexicana NOM-127-SSA1-2021.

En relación a la concentración de iones mayores y metales pesados, la concentración de calcio varía entre 17 y 165 ppm, el sodio se encuentra dentro del rango de 15 a 224 mg/l, sólo el agua del manantial ubicado en el Rancho Agua Caliente, al noroeste del área, rebasa el límite permisible por la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022."

La concentración de sulfatos varía entre 4 y 1652 mg/l, donde dos muestras exceden el límite permisible, una de ellas al sur del poblado Villa Hidalgo con 853 mg/l, otra tomada en una noria de uso pecuario, ubicada al sur del poblado San Juan del Río, con 1652 mg/l. El contenido de nitratos varía de 1 a 22 mg/l, donde la mayor concentración se registra en la noria ubicada al sur del poblado San Juan del Río, la cual también se excede en la concentración de sulfatos.

Para el caso del flúor su concentración varía de 0.42 a 10.75 ppm, donde el valor máximo se presenta en la noria ubicada al sur de San Juan del Río. En el caso de los metales pesados la Figura 6 muestra la ubicación de aprovechamientos cuyas concentraciones exceden la norma oficial mexicana.

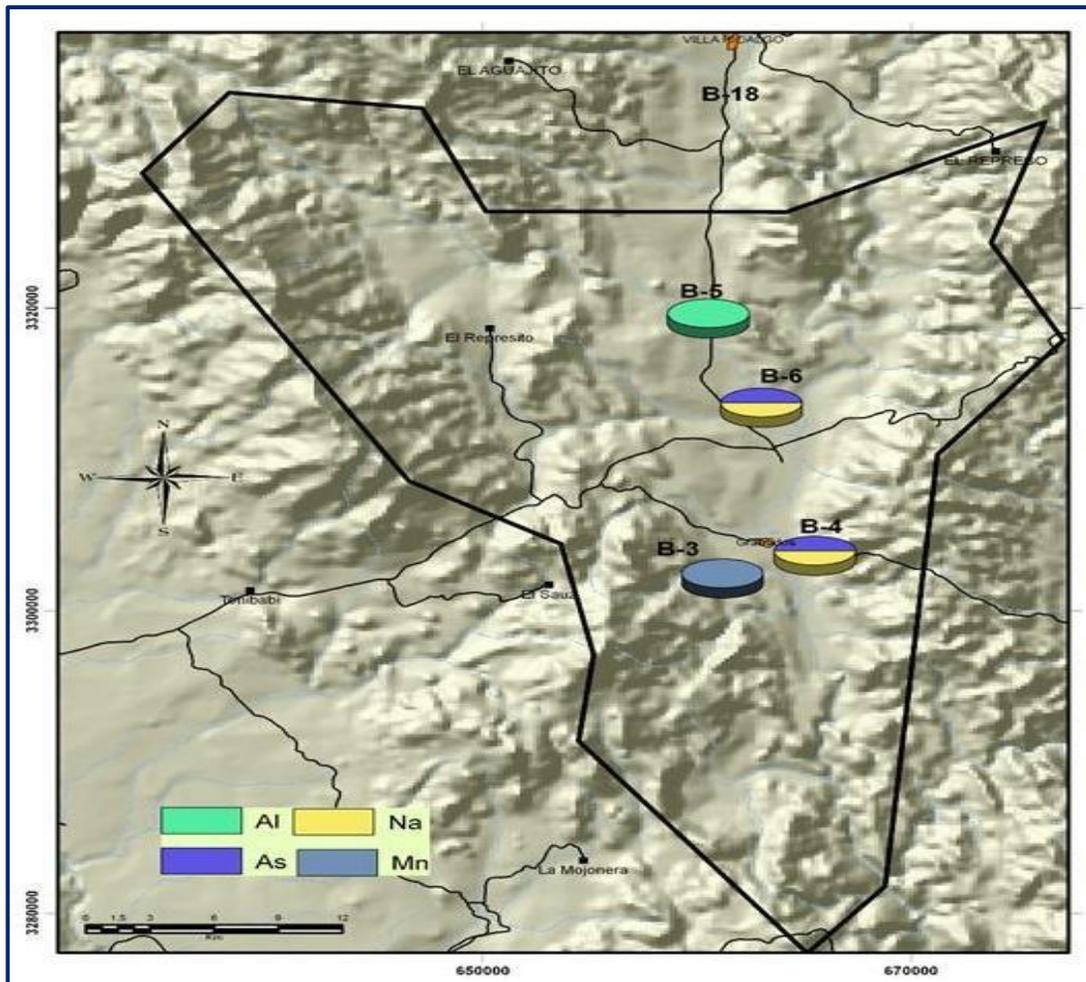


Figura 6. Aprovechamientos con presencia de elementos fuera de norma

La familia de agua que predomina es de tipo bicarbonatada-cálcica, la cual representa agua de reciente infiltración, con tiempos cortos de residencia en el acuífero.

De manera general, se puede establecer que la calidad del agua subterránea es buena, con excepción de sitios puntuales que exceden valores permisibles en uno o varios elementos, que no representan los valores promedio registrados en el acuífero y su presencia está relacionada al marco geológico y a los diferentes procesos de mineralización presentes en la zona.

Al suroeste del acuífero se localiza la presa de jales de la Mina La Caridad. El agua subterránea de los aprovechamientos ubicados en las márgenes del Río Bavispe no está influenciada por residuos minerales de dicha presa.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo realizado en el 2008, se registró la existencia de 22 de aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 15 corresponden a norias, 5 a manantiales y 2 a pozos. De ellas, 18 están activos y 4 inactivos.

Con relación al uso de los aprovechamientos 9 (40.9%) corresponden a uso pecuario, 4 (18.1%) a uso pecuario/doméstico, otros 4 se encuentran fuera de uso, 3 (13.7%) son utilizados para abastecimiento de agua potable, 1 (4.6%) para uso agrícola y la obra restante (4.6%) se destina al uso doméstico. En la Figura 8 se observa el uso del agua en función de su porcentaje.

El volumen de extracción conjunto se estimó en 0.94 hm³ anuales, de los cuales 0.68 hm³ (72.95%) se destinan al abastecimiento de agua potable a varios centros de población, 0.23 hm³ (24.9 %) para uso agrícola, 0.013 hm³ (1.3%) para uso pecuario, 0.001 hm³ (0.07%) para uso doméstico y el restante de 0.007 hm³ (0.78%) para uso pecuario/doméstico.

De acuerdo al censo realizado en el 2008, se registró la existencia de 22 de aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 15 corresponden a norias, 5 a manantiales y 2 a pozos. De ellas, 18 están activos y 4 inactivos.

Con relación al uso de los aprovechamientos 9 (40.9%) corresponden a uso pecuario, 4 (18.1%) a uso pecuario/doméstico, otros 4 se encuentran fuera de uso, 3 (13.7%) son utilizados para abastecimiento de agua potable, 1 (4.6%) para uso agrícola y la obra restante (4.6%) se destina al uso doméstico. En la Figura 6 se observa el uso del agua en función de su porcentaje.

El volumen de extracción conjunto se estimó en **0.9 hm³ anuales**, de los cuales 0.68 hm³ (72.95%) se destinan al abastecimiento de agua potable a varios centros de población, 0.23 hm³ (24.9 %) para uso agrícola, 0.013 hm³ (1.3%) para uso pecuario, 0.001 hm³ (0.07%) para uso doméstico y el restante de 0.007 hm³ (0.78%) para uso pecuario/doméstico.

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. El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de **355 km²**, que corresponde a la zona donde se localizan la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea. 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 de un acuífero:

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

7.1 Entradas

Representa la sumatoria de entradas de agua al sistema acuífero, ya sean naturales o inducidas. De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (Rt) está integrada por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero.

Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (Ri). Debido a que el volumen del agua destinada al uso agrícola es muy bajo y que no existen poblaciones urbanas de importancia en las que se generen infiltraciones de las fugas en las redes de distribución de agua potable y del alcantarillado, se considera que la recarga inducida es despreciable.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) tiende a ser nulo y a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy.

El valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

Dm: Descargas natural por manantiales

ETR: Evapotranspiración real

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) tiende a ser nulo y a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy, el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

Dn: Descargas natural por manantiales

ETR: Evapotranspiración real

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 isótopas 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 2008 (figura 5) De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

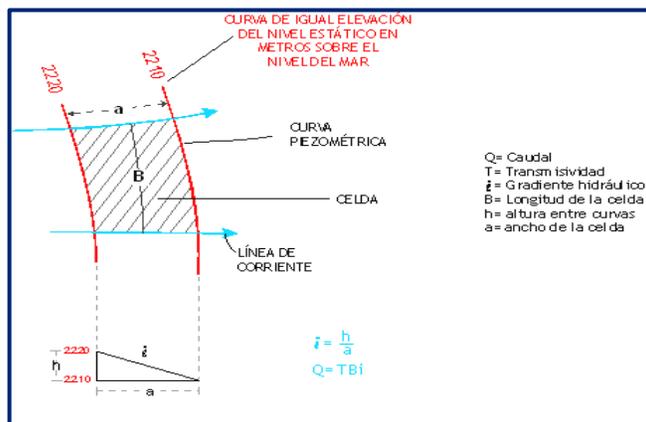
$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.



i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$)

Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

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

Donde:

T = Transmisividad en m^2/s .

B = Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m

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:

$$T = K b$$

De acuerdo con el mapa de elevación del nivel estático, se identificaron celdas de entrada en las porciones noroeste, este, noreste y suroeste del acuífero.

Para la estimación de los volúmenes de agua que fluyen a través de ellas se utilizaron valores de transmisividad de $1.73 \times 10^{-4} m^2/s$ ($15 m^2/día$), $2.31 \times 10^{-4} m^2/s$ ($20 m^2/día$), $1.15 \times 10^{-4} m^2/s$ ($10 m^2/día$), $1.50 \times 10^{-3} m^2/s$ ($130 m^2/día$), respectivamente, según las características geológicas y espesor saturado promedio en cada una de ellas.

Como resultado del cálculo se obtuvo un valor de **6.2 hm³/año** que representa las entradas horizontales dentro del área de balance definida en el valle (tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
			(m)		(m ² /s)		
E1	5060	2767	100	0.0361	0.000173	0.0316	1.0
E2	5295	2935	100	0.0341	0.000173	0.0312	1.0
E3	4082	2823	100	0.0354	0.000231	0.0334	1.1
E4	4212	2896	100	0.0345	0.000231	0.0336	1.1
E5	4279	1876	50	0.0267	0.000115	0.0131	0.4
E6	5620	1800	50	0.0278	0.000115	0.0180	0.6
E7	2185	894	10	0.0112	0.001500	0.0367	1.2
Total entradas							6.2

7.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el acuífero Villa Hidalgo las descargas están representadas por el bombeo (B), evapotranspiración (ETR), Descarga natural por manantiales (Dn) y salidas horizontales (Sh).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

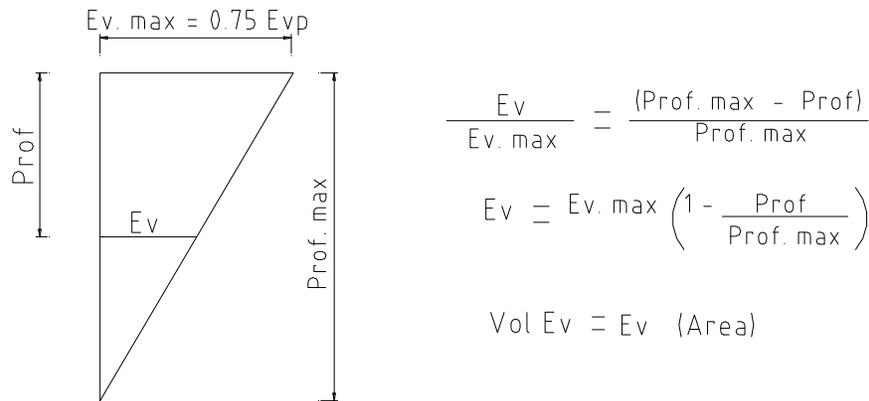
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que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

Dado que la lámina de precipitación pluvial media anual es del orden de los 348 mm y la temperatura promedio de 25.1° C, al aplicar el método empírico de Turc para estimar ETR, su valor resulta mayor que la precipitación media, invalidando el resultado. En general, para climas áridos los métodos empíricos para estimar ETR (Turc, Coutagne, por ejemplo) se invalidan para valores inferiores a los 350 mm anuales, dependiendo del valor de la temperatura media anual.

Para el caso particular de este acuífero, la evapotranspiración se presenta en los subálveos del Río Bavispe y otros tributarios de menor influencia en la zona, donde existen niveles freáticos someros y vegetación nativa.

La evaporación potencial promedio de la zona es de 2,282 mm anuales. Si se toma en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, se utiliza un factor de corrección de 0.75 (Saxton & McGuinness, 1982, p. 235).

Considerando que en una superficie 14.5 km² se presentan niveles freáticos someros (Figura 5), con un valor máximo de 4 m de profundidad de extinción, que corresponde en este caso a la profundidad de las raíces de la vegetación nativa y de la profundidad media al nivel estático en la zona de niveles freáticos someros, al considerar la variación que tiene la evaporación con respecto a la profundidad, la evapotranspiración es calculada de la siguiente manera:



ETR = [0.75 (Evaporación Prom.) (Área)] / Prof. Máxima

ETR = [(0.75) (2.282 m) (14.5 km²)]/5 = 6.2 hm³ anuales

El resultado de aplicar la fórmula anterior, da como resultado un valor de evapotranspiración de **6.2 hm³/año**.

7.2.2 Descargas naturales por manantiales (Dm)

En la zona del acuífero las descargas naturales están representadas por cinco pequeños manantiales perennes, con un volumen estimado de **0.1 hm³/año**.

7.2.3 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **0.9 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El volumen de las salidas subterráneas se calculó de la misma manera que las entradas subterráneas, tomando en cuenta la elevación del nivel estático mostrada en la figura 5 y a través de la Ley de Darcy. En la tabla 3, se muestra el cálculo de salidas subterráneas; **2.6 hm³/año**, hacia el acuífero Huásabas.

Tabla 3. Estimación de salidas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
			(m)		(m ² /s)		
S1	1628	1071	10	0.0093	0.0028	0.0426	1.3
S2	1693	1193	10	0.0084	0.0028	0.0397	1.3
Total salidas							2.6

Para la estimación de las salidas se utilizó un valor de $T = 200 \text{ m}^2/\text{día}$ ($2.31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), debido a que la zona donde se ubicaron las celdas forma parte de la planicie de inundación del Río Bavispe.

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 para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, la configuración de elevación del nivel estático no muestra aún la presencia de conos de abatimiento o deformaciones de la dirección natural del flujo subterráneo, que sean ocasionados por la concentración del bombeo o de aprovechamientos.

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.

$$\text{Por lo tanto } \Delta V(S) = 0$$

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 por lluvia (R_v), por lo que, despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$R_v = B + Sh + D_n + ETR - \Delta V(S) - E_h$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 0.9 + 2.6 + 0.1 + 6.2 - 0 - 6.2$$

$$R_v = 3.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a $R = R_v + E_h$

$$R = 3.6 + 6.2$$

$$R = 9.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

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 **9.8 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 **DNC = 0.1 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 **1,104,719 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 9.8 - 0.1 - 1.104719 \\ \text{DMA} &= 8.595281 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **8,595,281 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos, México, Distrito Federal.