

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Villa Hidalgo (2652),
Estado de Sonora***

Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE SONORA							
2652	VILLA HIDALGO	9.8	0.1	0.227293	0.9	9.472707	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA
EN EL ACUÍFERO 2652 VILLA HIDALGO, ESTADO
SONORA***

México, D.F. Junio de 2009

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.....	8
4. GEOLOGÍA	9
4.1. Estratigrafía	9
4.2. Geología Estructural	13
4.3. Geología del Subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1. Tipo de Acuífero	15
5.2. Parámetros Hidráulicos.....	16
5.3. Piezometría	16
5.4. Comportamiento hidráulico	17
5.4.1. Profundidad al Nivel Estático.....	17
5.4.2. Elevación del Nivel Estático	17
5.4.3. Evolución del Nivel Estático	18
5.5. Hidrogeoquímica y Calidad del Agua	21
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 horizontal (Eh)	24
7.2. Salidas.....	26
7.2.1. Evapotranspiración (ETR)	26
7.2.2. Descargas naturales por manantiales (Dn)	28
7.2.3. Bombeo (B).....	28
7.2.4. Salidas por flujo horizontal (Sh).....	28
7.3. Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$).....	28
8. DISPONIBILIDAD.....	29
8.1. Recarga total media anual (Rt)	30
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	30
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS).....	30
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS).....	30

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa).

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 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, 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).

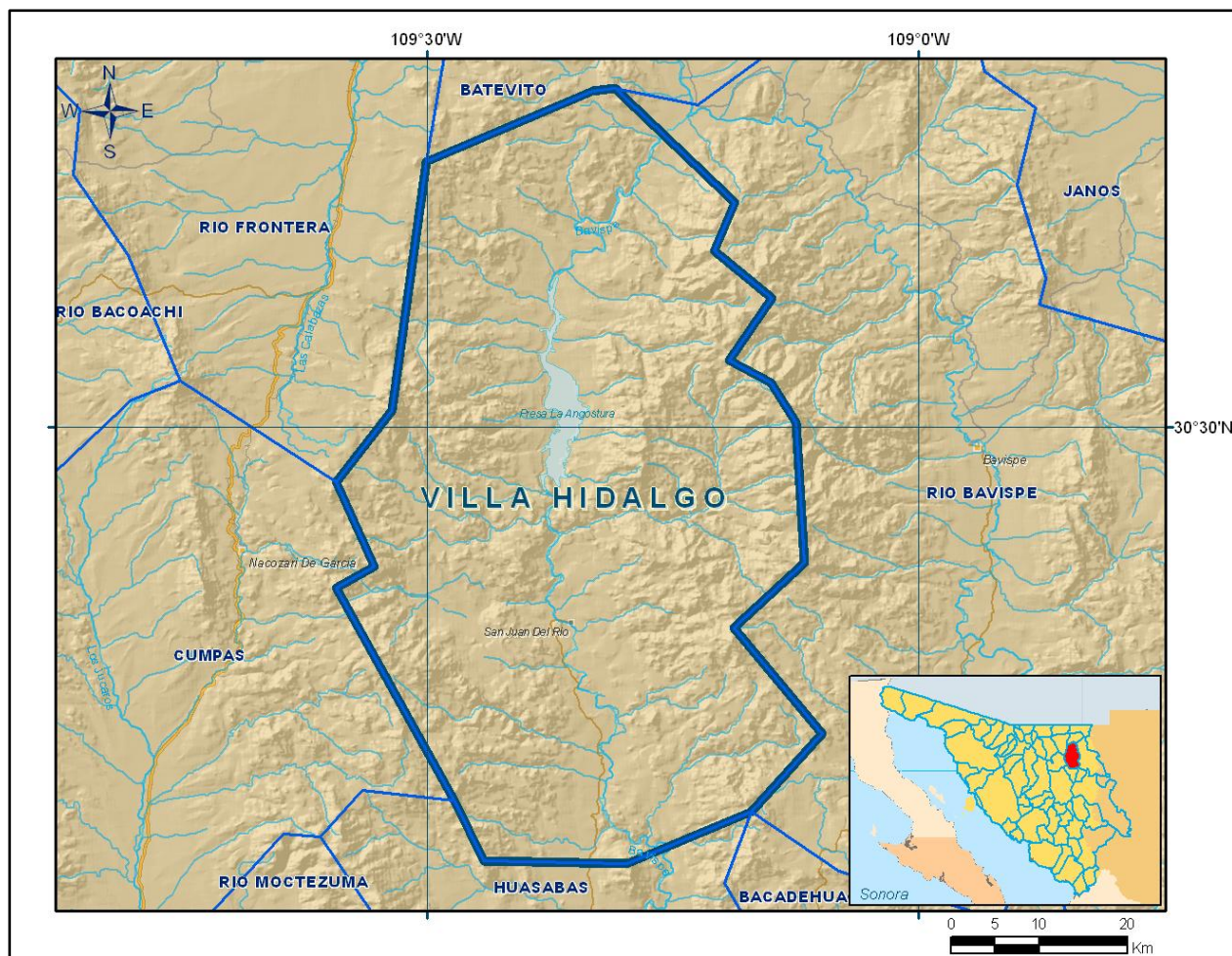


Figura 1. Localización del Acuífero Villa Hidalgo

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 geográficas de la poligonal simplificada del acuífero
ACUÍFERO 2652 VILLA HIDALGO

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	VÉRTICE	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	1.8	30	46	13.6
19	109	19	54.6	30	50	30.1
20	109	18	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 (2009), los municipios Nacozari de García y Agua Prieta se ubican en zona de disponibilidad 6, y los restantes

municipios Villa Hidalgo, Fronteras, Bavispe, Bacerac, Huachinera y Huásabas, pertenecen a la zona de disponibilidad 7.

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 Reparo, Los Paredones, Loma Las Lobera y el valle La Isla.

En la zona predominan cuatro fisiotipos:

III-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.

IV-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.

IV-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 millones de m³.

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.

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 la 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 subyacida 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 Reparo, 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.

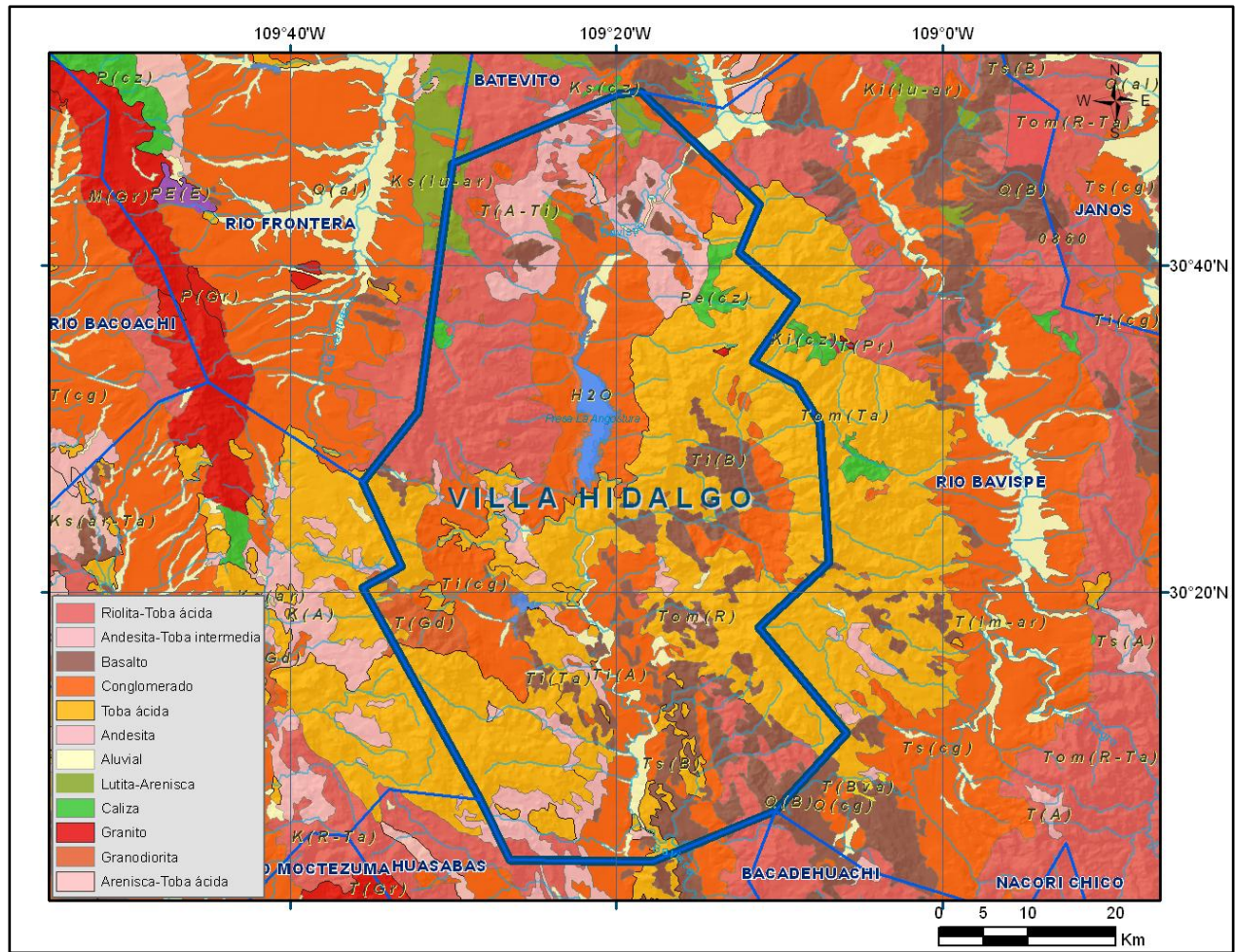


Figura 2. Mapa Geológico

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.

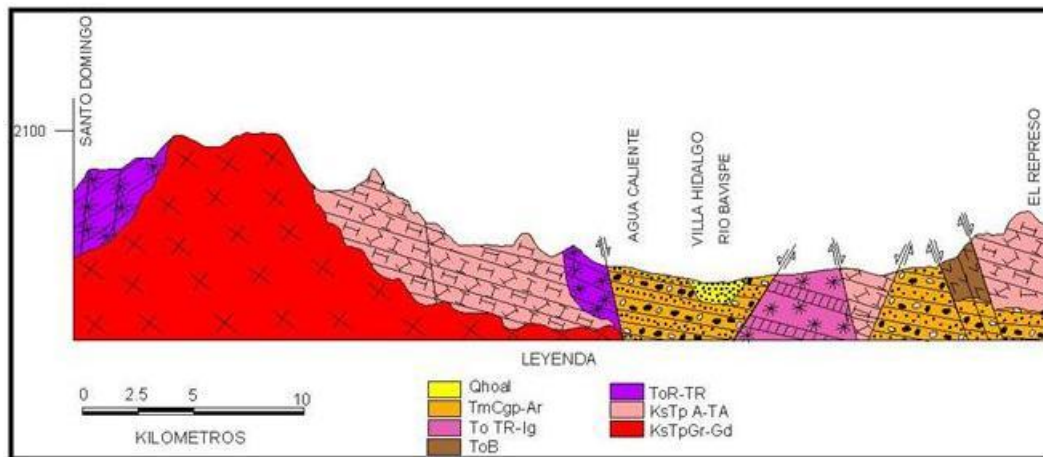


Figura 3. Modelo conceptual de funcionamiento acuífero

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de Acuífero

Se trata de un sistema acuífero de tipo libre, donde el agua tiene movimiento a través de materiales granulares y fracturados. El medio granular está constituido por depósitos no consolidados y semiconsolidados de granulometría variada (gravas, arenas, limos y arcillas) que se depositaron en la planicie de inundación del cauce del Río Bavispe, de espesor limitado que varía entre 20 y 60 m.

La fuente principal de recarga al acuífero es la infiltración de la lluvia en el valle, de los escurrimientos generados en las zonas serranas que delimitan el acuífero, así como el agua que se infiltra en las zonas topográficamente altas y que alimenta al acuífero e forma de flujos subterráneos.

El acuífero formado en material aluvial de edad reciente es la principal fuente de abastecimiento para uso público-urbano de los poblados de Villa Hidalgo, San Juan del Río y demás poblaciones menores de la zona. Existe la posibilidad que bajo el material

conglomerático consolidado exista un acuífero en material fracturado con potencial que varía de medio a bajo, sin embargo éste no ha sido explorado.

Los niveles estáticos de los aprovechamientos fuera de la influencia del Río Bavispe, se abaten de manera importante durante la temporada de estiaje y se recuperarse en época de lluvias.

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 de 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. Todas ellas reciben agua que se infiltra en zonas topográficamente altas, constituidas por rocas volcánicas fracturadas.

De manera difusa se produce infiltración de agua de lluvia sobre la zona de valle, así como por infiltración en la zona de cauce del Río Bavispe, por el cual fluye agua prácticamente todo el año debido a las descargas de la Presa La Angostura.

La principal descarga natural del sistema acuífero es de tipo subterránea, se concentra en el extremo sur del área hacia el Acuífero Huásabas y por evapotranspiración en la zona donde se registran niveles freáticos someros. El acuífero responde de una manera rápida a la recarga por efecto de las lluvias

5.4.1. Profundidad al Nivel Estático

La profundidad al nivel estático para el 2008 varía de 1.0 a 22.0 m (Figura 4), registrándose los valores más altos en los pozos ubicados en los ranchos Cumurali y El Destierro, localizados al centro y noroeste del acuífero, el primero perforado en material conglomerático cementado, y el segundo en material volcánico; cuyos gastos varían entre 2 5 lps. Los valores promedio de profundidad son de 1.0 a 9.0 m, especialmente en la zona de influencia del Río Bavispe.

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.

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 hm^3 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.

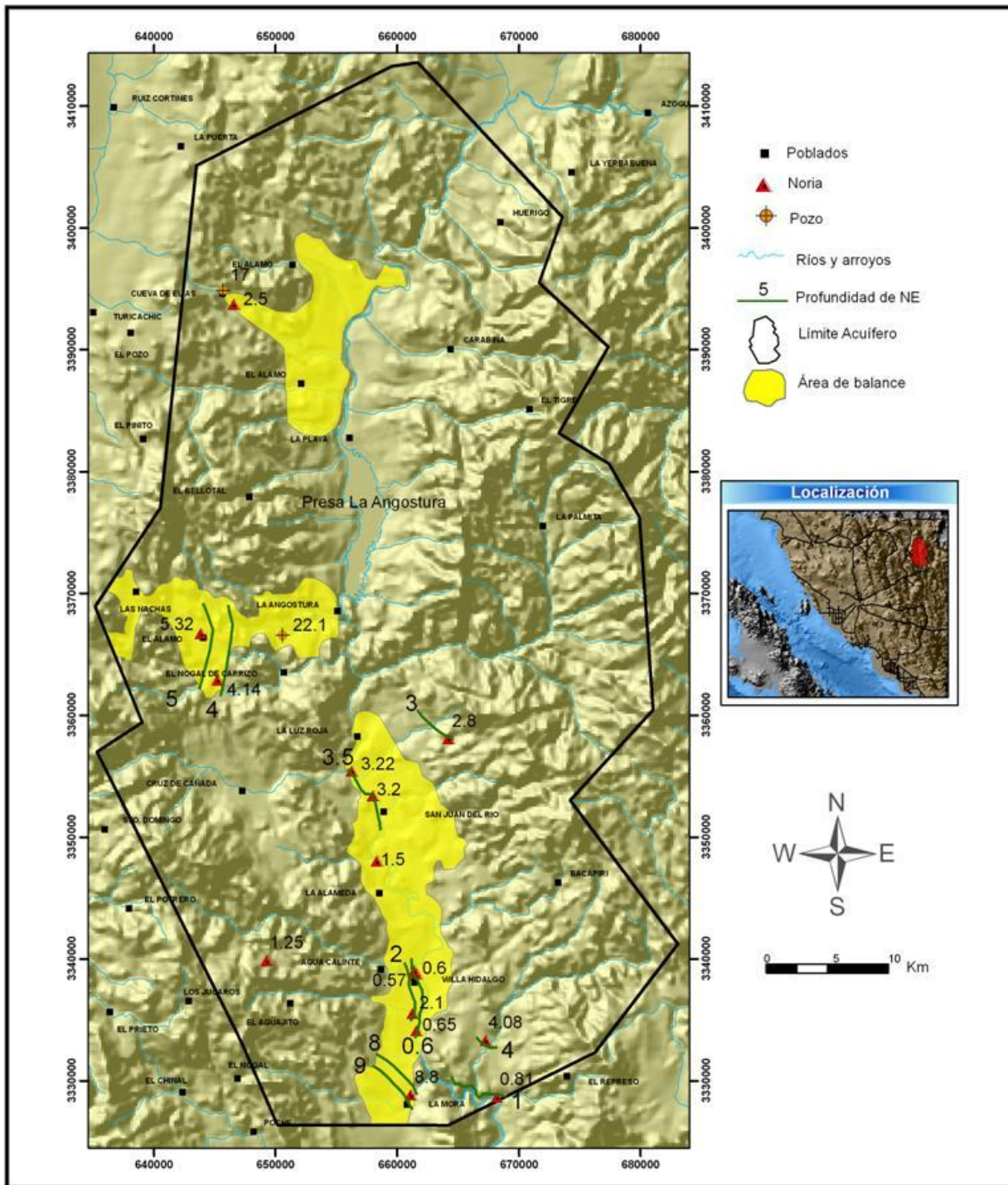


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008) y zona de balance

5.5. Hidrogeoquímica y Calidad del Agua

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 físicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) no superan las 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-SSA1-1994.

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. 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.

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.

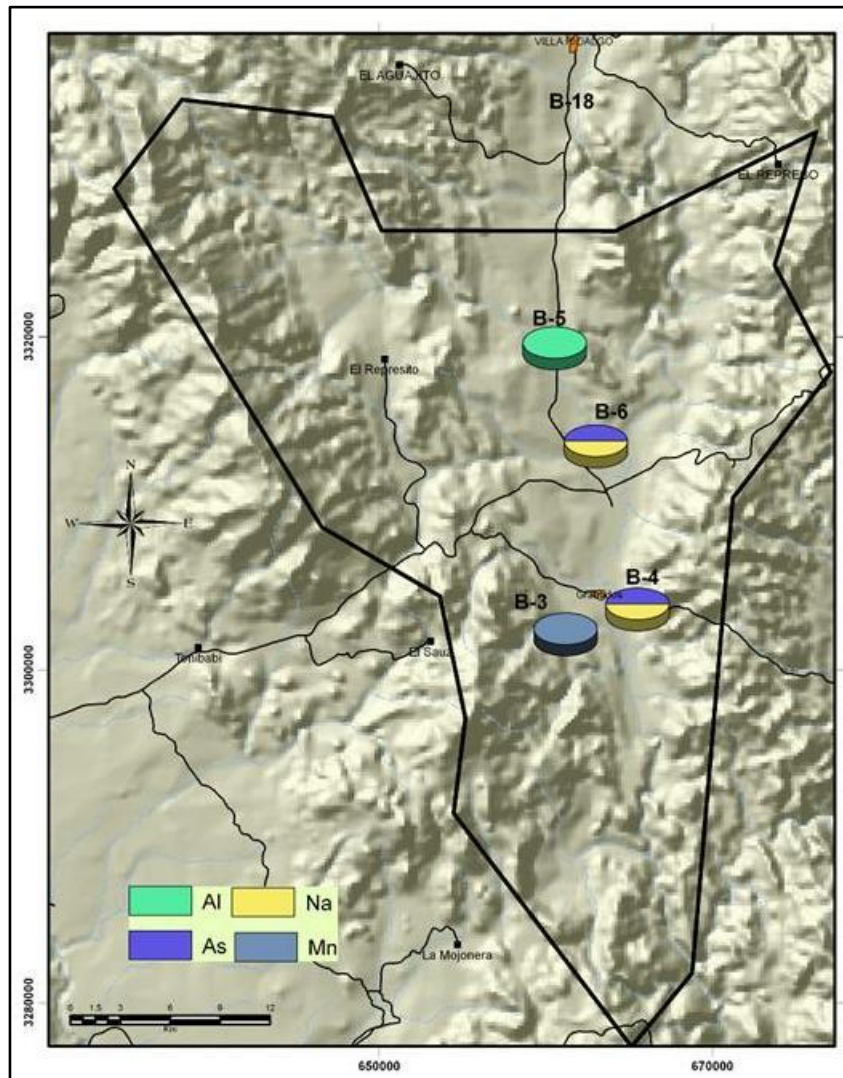


Figura 6. Aprovechamientos con presencia de elementos fuera de norma

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 hm^3 anuales, de los cuales 0.68 hm^3 (72.95%) se destinan al abastecimiento de agua potable a varios centros de población, 0.23 hm^3 (24.9 %) para uso agrícola, 0.013 hm^3 (1.3%) para uso pecuario, 0.001 hm^3 (0.07%) para uso doméstico y el restante de 0.007 hm^3 (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 km^2 , 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 (R_t) 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 (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

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 (R_i). 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
Dn: Descargas natural por manantiales
ETR: Evapotranspiración real
 $\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2. Entradas por flujo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tienen su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos

líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado. La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 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:

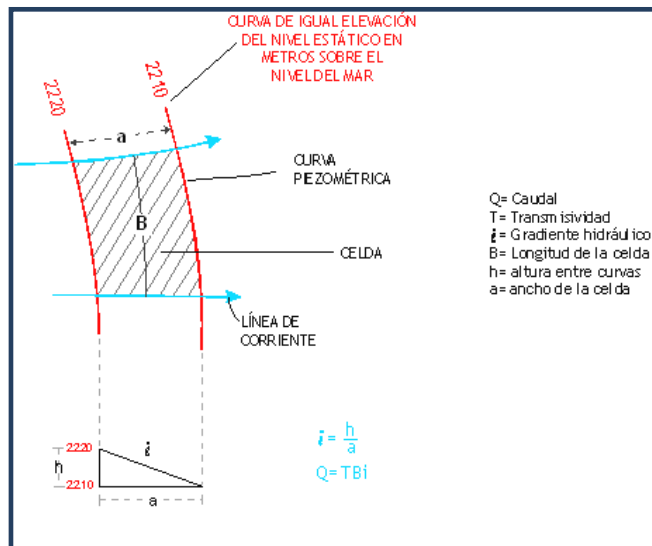
$$V = K \cdot i$$

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 $1.73 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($15 \text{ m}^2/\text{día}$), $2.31 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($20 \text{ m}^2/\text{día}$), $1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($10 \text{ m}^2/\text{día}$), $1.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($130 \text{ m}^2/\text{día}$), respectivamente, según las características geológicas y espesor saturado promedio en cada una de ellas.

Como resultado del cálculo se obtuvo un valor de **$6.2 \text{ hm}^3/\text{año}$** 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
			(m)		(m^2/s)		($\text{hm}^3/\text{año}$)
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).

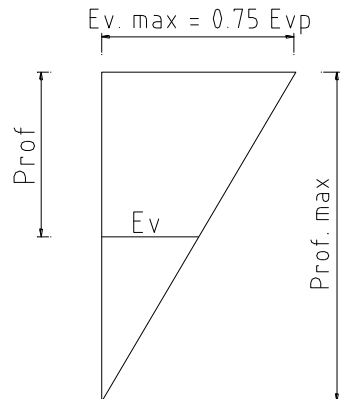
Dado que la lámina de precipitación pluvial media anual es del orden de los 348 mm y la temperatura promedio de 25.1°C , al aplicar el método empírico de Turc para estimar ETR, su

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 km^2 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:



$$\frac{Ev}{Ev. \max} = \frac{(Prof. \max - Prof)}{Prof. \max}$$

$$Ev = Ev. \max \left(1 - \frac{Prof}{Prof. \max} \right)$$

$$Vol \ Ev = Ev \ (Area)$$

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

$$ETR [(0.75) (2.282 \ m) (14.5 \ km^2)]/5 = 6.2 \ hm^3 \ anuales$$

El resultado de aplicar la fórmula anterior, da como resultado un valor de evapotranspiración de **6.2 $hm^3/año$** .

7.2.2. Descargas naturales por manantiales (Dn)

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. 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**.

7.2.4. Salidas por flujo 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.

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 $R_t = R_v + E_h$

$$R_t = 3.6 + 6.2$$

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

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad \text{--- (3)}$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica.

R_t = Recarga total media anual.

$DNCOM$ = Descarga natural comprometida.

$VCAS$ = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA.

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso particular, su valor es de **9.8 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes.

Para el acuífero Villa Hidalgo se consideró que un valor de la descarga natural comprometida de **0.1 hm³/año**, que corresponde a la descarga de los manantiales. Las salidas horizontales no se consideran comprometidas debido a que aguas abajo, en el acuífero Huásabas, no existen obras hidráulicas para su aprovechamiento.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2009, es de 467,293 m³/año**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPD.

De acuerdo con la expresión (3), se tiene que:

$$\text{DAS} = 9.8 - 0.1 - 0.467293$$

$$\text{DAS} = 9.232707 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **9'232,707 m³/año** anuales para otorgar nuevas concesiones.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que el valor sea mayor, sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Comisión Nacional del Agua, 2008. Actualización Hidrogeológica de los Acuíferos del Río Yaqui, Mátape, Sonora. Hermosillo, Sonora, realizado por el Servicio Geológico Mexicano.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Estudio Geohidrológico del Estado de Sonora.

