

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Río Bavispe (2631),  
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 |             |                                              |       |           |        |          |          |
| 2631             | RÍO BAVISPE | 29.7                                         | 0.5   | 24.541730 | 15.2   | 4.658270 | 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 2631 RÍO BAVISPE, ESTADO  
SONORA***

***México, D.F. Julio de 2009***

## CONTENIDO

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 1. GENERALIDADES.....                                 | 2  |
| Antecedentes .....                                    | 2  |
| 1.1. Localización.....                                | 2  |
| 1.2. Situación Administrativa del Acuífero.....       | 5  |
| 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD..... | 5  |
| 3. FISIOGRAFÍA .....                                  | 6  |
| 3.1. Provincia Fisiográfica.....                      | 6  |
| 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 .....                                | 17 |
| 5.4. Comportamiento Hidráulico .....                  | 17 |
| 5.4.1. Profundidad al Nivel Estático.....             | 17 |
| 5.4.2. Elevación del Nivel Estático .....             | 18 |
| 5.4.3. Evolución del Nivel Estático .....             | 21 |
| 5.5. Hidrogeoquímica y Calidad del Agua.....          | 21 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....      | 22 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....                | 22 |
| 7.1. Entradas .....                                   | 22 |
| 7.1.1. Recarga Vertical (Rv).....                     | 23 |
| 7.1.2. Recarga Inducida (Ri) .....                    | 23 |
| 7.2. Salidas.....                                     | 26 |
| 7.2.1. Evapotranspiración real (ETR) .....            | 26 |
| 7.2.2. Bombeo (B).....                                | 27 |
| 7.2.3. Salidas subterráneas (Sh).....                 | 27 |
| 7.2.4. Descargas naturales por manantiales (Dn) ..... | 28 |
| 7.3. Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$ .....     | 28 |
| 8. DISPONIBILIDAD.....                                | 29 |
| 8.1. Recarga Total Media Anual .....                  | 29 |
| 8.2. Descarga Natural Comprometida.....               | 29 |

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CNA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la 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, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, 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 de 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, a transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

#### **1.1. Localización**

El acuífero Río Bavispe, definido con la clave 2631 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción norte del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 29°48'26" y 31°01'08" de latitud, y 109°20'51" y 108°10'16" de longitud, cubriendo una superficie de 5885 km<sup>2</sup>. Limita al norte con los acuíferos Batevito y Arroyo San Bernardino, al oeste con Villa Hidalgo, Bacadéhuachi y Huásabas; al sur con Nácori Chico, La Norteña, y al este con acuíferos que pertenecen al Estado de Chihuahua: Janos, Casas Grandes e Ignacio Zaragoza (figura 1).

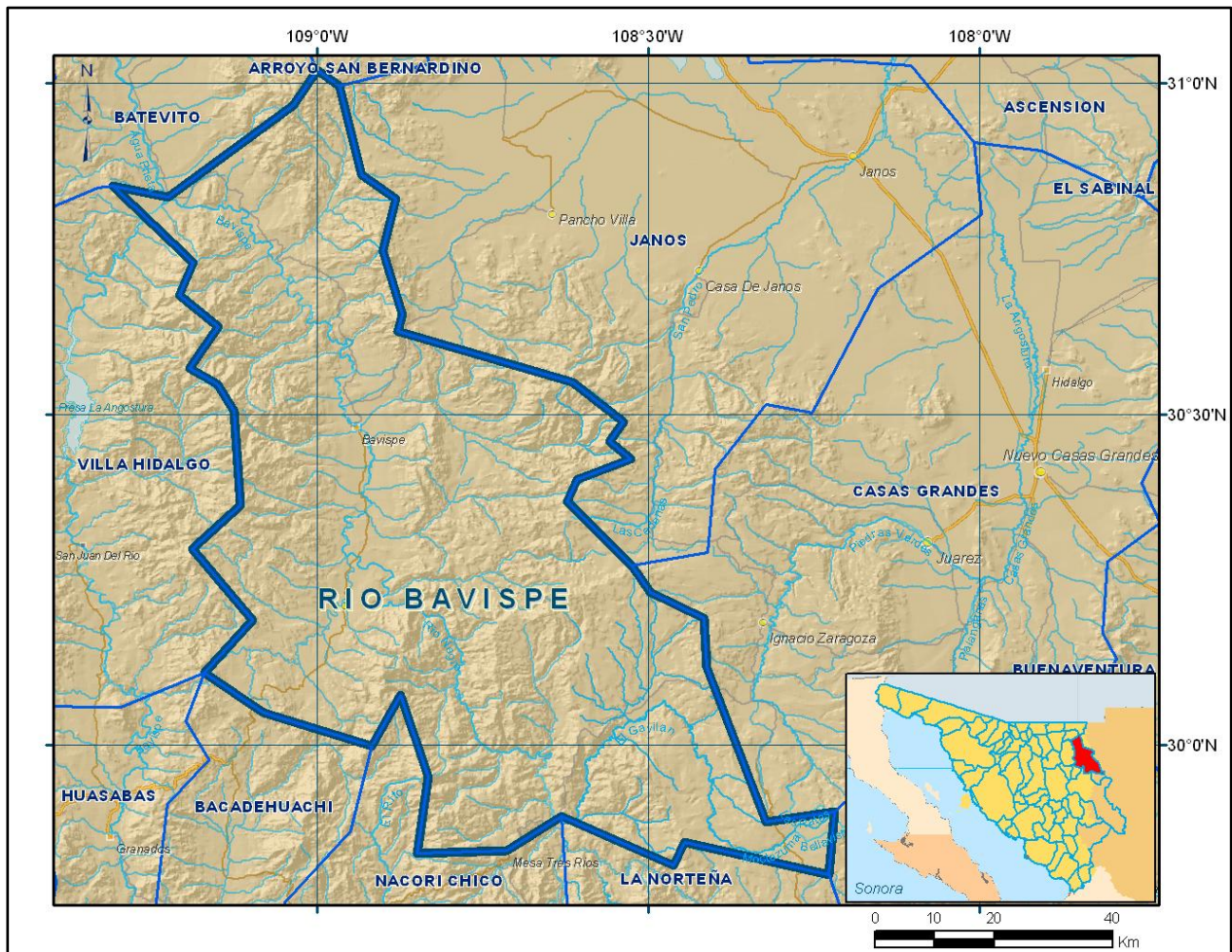


Figura 1. Localización del acuífero Río Bavispe

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Bavispe, Bacerac, Huachineras, Casas Grandes, Madera, Agua Prieta, Janos, Bacadéhuachi, Nacori Chico, Nacozari de García y Villa Hidalgo. 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 2631 RÍO BAVISPE**

| VÉRTICE | LONGITUD OESTE |         |          | LATITUD NORTE |         |          |
|---------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
|         | GRADOS         | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS        | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1       | 109            | 2       | 9.7      | 30            | 57      | 55.3     |
| 2       | 109            | 0       | 0.4      | 31            | 1       | 6.1      |
| 3       | 108            | 58      | 1.3      | 30            | 59      | 44.8     |
| 4       | 108            | 56      | 1.5      | 30            | 51      | 39.9     |
| 5       | 108            | 52      | 55.1     | 30            | 49      | 28.8     |
| 6       | 108            | 54      | 3.3      | 30            | 44      | 45.9     |
| 7       | 108            | 52      | 15.3     | 30            | 39      | 2.8      |
| 8       | 108            | 52      | 41.4     | 30            | 37      | 28.8     |
| 9       | 108            | 36      | 51.1     | 30            | 32      | 52.5     |
| 10      | 108            | 32      | 18.5     | 30            | 29      | 15.9     |
| 11      | 108            | 33      | 31.5     | 30            | 27      | 30.9     |
| 12      | 108            | 31      | 34.0     | 30            | 25      | 54.2     |
| 13      | 108            | 36      | 25.8     | 30            | 24      | 7.6      |
| 14      | 108            | 37      | 20.9     | 30            | 22      | 6.5      |
| 15      | 108            | 31      | 29.5     | 30            | 16      | 16.8     |
| 16      | 108            | 29      | 51.0     | 30            | 13      | 53.2     |
| 17      | 108            | 24      | 58.3     | 30            | 11      | 33.2     |
| 18      | 108            | 24      | 42.9     | 30            | 7       | 3.9      |
| 19      | 108            | 19      | 23.1     | 29            | 53      | 3.7      |
| 20      | 108            | 13      | 9.9      | 29            | 53      | 59.7     |
| 21      | 108            | 13      | 41.6     | 29            | 48      | 16.5     |
| 22      | 108            | 26      | 43.5     | 29            | 51      | 15.7     |
| 23      | 108            | 27      | 42.3     | 29            | 49      | 8.4      |
| 24      | 108            | 37      | 54.2     | 29            | 53      | 32.8     |
| 25      | 108            | 42      | 50.4     | 29            | 50      | 30.2     |
| 26      | 108            | 50      | 56.5     | 29            | 50      | 11.5     |
| 27      | 108            | 49      | 56.0     | 29            | 57      | 10.4     |
| 28      | 108            | 52      | 25.6     | 30            | 4       | 35.8     |
| 29      | 108            | 55      | 5.7      | 29            | 59      | 59.5     |
| 30      | 109            | 4       | 53.5     | 30            | 2       | 58.9     |
| 31      | 109            | 10      | 14.7     | 30            | 6       | 33.8     |
| 32      | 109            | 5       | 54.4     | 30            | 11      | 20.0     |
| 33      | 109            | 11      | 17.9     | 30            | 17      | 47.2     |
| 34      | 109            | 6       | 58.3     | 30            | 21      | 45.3     |
| 35      | 109            | 7       | 30.6     | 30            | 30      | 19.4     |
| 36      | 109            | 9       | 2.1      | 30            | 32      | 42.2     |
| 37      | 109            | 11      | 35.7     | 30            | 34      | 6.8      |
| 38      | 109            | 8       | 58.2     | 30            | 37      | 54.3     |
| 39      | 109            | 12      | 29.1     | 30            | 40      | 47.4     |
| 40      | 109            | 11      | 13.3     | 30            | 43      | 42.4     |
| 41      | 109            | 18      | 33.3     | 30            | 50      | 40.4     |
| 42      | 109            | 13      | 30.5     | 30            | 49      | 39.0     |
| 1       | 109            | 2       | 9.7      | 30            | 57      | 55.3     |

## **1.2. Situación Administrativa del Acuífero**

El Acuífero Río Bavispe pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y se encuentra sujeto a tres decretos de veda, al primero es el *“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 zona noreste y centro oriental está sujeta a la disposición del decreto de veda tipo II *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en una superficie comprendida en los límites geopolíticos del Municipio Ascensión y Janos, Estado de Chihuahua*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de abril de 1979.

De igual manera, en la porción suroriental del acuífero está en vigor el decreto de veda tipo II *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Municipio de Galeana y de las zonas no vedadas por el Acuerdo de 16 junio de 1954”* publicado en el Diario oficial de la Federación el 27 de marzo de 1981.

El resto de la superficie que comprende el acuífero no se encuentra bajo algún decreto de veda.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2009), los municipios de Nácori Chico y Madera corresponden a la zona de disponibilidad 8, Bavispe, Bacerac, Huachineras, Bacadéhuachi y Villa Hidalgo a la zona 7, Agua Prieta y Nacozari de García a la 6 y Janos a la zona 4.

El uso principal del agua subterránea es 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. Los únicos realizados son con fines de exploración minera.

**ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA.** Realizado 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 Río Bavispe, 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.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia Fisiográfica**

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas propuesta por E. Raisz (1964), el acuífero Río Bavispe pertenece fisiográficamente a la Provincia Sierra Madre Occidental subprovincia Sierras y Cañadas del Norte, la cual se caracteriza por la presencia de sierras orientadas preferentemente en dirección noroeste-sureste, norte sur y noreste-suroeste. En esta subprovincia se aprecia el predominio de sierras con altitudes de más de 2000 m ocasionalmente asociadas a valles (INEGI, 1993).

La zona se caracteriza por una serie de sierras con topografía abrupta, tal es el caso de las sierras Los Pilares de Teras, El Tigre, San Diego, Los Tules, Serruchito, Hachita Hueca, Los Azules, La Cabellera y El Palomo, cuyas altitudes alcanzan hasta los 2600 msnm, mientras que la zona de valle tiene una amplitud de 10 Km, con una longitud de alrededor de 80 km, donde su elevación en promedio es de 1000 msnm, formando lomeríos con topografía suave.

#### **3.2. Clima**

De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por E. García (1981), la zona corresponde al grupo de climas secos, del subtipo semiseco en la mayor parte del acuífero y seco en la porción centro y noroeste del acuífero; el tipo de clima subhúmedo predomina en la porción sur del acuífero y las partes altas de las Sierras El tigre y El Palomo. A continuación se hace una breve descripción de los tipos de clima que predominan en el acuífero.

**Seco semicálido con lluvias en verano BS0hw(x').** Se distribuye en una franja de la parte central hacia el norte y la esquina noroeste del acuífero, abarcando un 7.4% del área total. Las temperaturas medias anuales de este clima comprenden un rango de 18 a 22° C. Estas zonas se caracterizan por tener un invierno fresco y un porcentaje de precipitación invernal mayor de 10.2 mm y con una precipitación anual menor de 500 mm.

**Semiseco semicálido con lluvias en verano BS1hw(x').** Se distribuye en poco más de la mitad del área del acuífero, cubriendo la zona central y parte de los flancos oriente y poniente. Su rango de temperatura anual varía de 18 a 22° C, precipitación anual de 400 a 700 mm y temperatura del mes más frío entre 3 y 1° C.

**Semifrío subhúmedo con humedad media C(E)(w1)(x').** Se presenta en el 3.9% del área, específicamente en el extremo oriental del acuífero. Su temperatura media anual varía entre 5 y 12°C, con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 %.

**Semifrío subhúmedo con humedad alta C(E)(w2)(x').** Se distribuye en un 7% del área del acuífero. Temperatura media anual entre 5 y 12°C, porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 %.

**Subhúmedo Templado C(w0)(x').** Se presenta en un 25% del área, hacia la porción sur del acuífero, con temperatura media anual entre 12 y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18° C.

El análisis climatológico se realizó con la información de seis estaciones con influencia en el área del acuífero, siendo estas la Colonia Morelos, Bavispe, Bacerac, Huachineras, Aribabi y Bacadéhuachi, localizadas en las poblaciones que llevan el mismo nombre.

La temperatura media anual de la zona es de 19.7° C. De acuerdo con los registros de las estaciones climatológicas referidas y con base en el método de polígonos de Thiessen, se determinó una precipitación media anual de 440 mm, se estima que la evaporación potencial es de 1936 mm/año.

### 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 área es el Río Bavispe, de tipo perene, nace en la Sierra Madre Occidental, cerca del límite con el Estado de Chihuahua, tiene una longitud de 371 km y una pendiente promedio de 0.46%, con una dirección preferente dentro del acuífero sureste-noroeste, descarga sus aguas en la confluencia de los acuíferos Bavispe, Villa Hidalgo y Batevito, para después cambiar su dirección al sur rumbo a la Presa Lázaro Cárdenas (La

angostura), ubicada en el acuífero Villa Hidalgo. Sus principales afluentes son el Arroyo Bacadéhuachi y los ríos Agua Prieta y Negro (INEGI, 1993). Algunos arroyos existentes dentro del acuífero son La Cañada, que nace en Ojo de Agua Caliente y es perenne, El Río Bamochi que es intermitente pero es un afluente importante para el Río Bavispe, así como los arroyos La Joya, Babidanchic, Mechapa, Tasahinora y Zorrillo

La infraestructura hidráulica consiste de obras de captación de agua subterránea, siendo en su mayoría norias con niveles estáticos de poca profundidad y en menor proporción existe la presencia pozos, los cuales por estar perforados en material fracturado presentan un bajo rendimiento; además de una serie de canales que conducen agua para apoyo a la agricultura, tal es el caso de la zona de valle del Municipio de Bavispe, donde existen 8 canales de riego con una longitud total de 55.5 km, de los cuales únicamente 10 están revestidos. En el municipio de Huachineras existen tomas directas que se hacen sobre el Río Bavispe auxiliado por 4 canales de riego con una longitud de 15 km.

### **3.4. Geomorfología**

Debido a las reducidas distancias existentes de una elevación a otra, la geomorfología del área corresponde al ciclo de juventud avanzada.

Dentro del área que abarca el acuífero existen altitudes que van desde los 900 msnm en la zona de valle, hasta poco más de 2600 msnm en la Sierra El Palomo y el límite sureste del acuífero. Asimismo en la parte poniente del acuífero, particularmente la Sierra Pilares de Teras, alcanza una elevación de 2340 msnm, mientras que en la Sierra El Tigre se presentan elevaciones de 2400 msnm, a su vez la Sierra San Diego registra valores de 2360 msnm, la Sierra El Oso con 2140 msnm; al sur del acuífero La Sierra El Gato alcanza 2420 msnm.

De manera general, el drenaje predominante en la zona es de tipo dendrítico, asociado a rocas sedimentarias recientes, aunque algunos arroyos de tipo intermitente presentan drenaje del tipo radial asociado a materiales predominantemente volcánicos. Asimismo en el cauce del Río Bavispe se observa la formación de meandros, lo que evidencia el ciclo de juventud avanzada.

## **4. GEOLOGÍA**

### **4.1. Estratigrafía**

El área se caracteriza por presentar un contexto geológico variado, afloran unidades que van desde el Proterozoico Medio hasta el Holoceno, representadas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuya distribución geográfica se observa en la Figura 2.

A continuación se hace una breve descripción de las unidades litológicas, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente.

#### **PRECÁMBRICO**

**Granito Las Mesteñas (pTmGr-Gd).** Es un cuerpo de composición granítica de edad Precámbrico medio, que se caracteriza por contener xenolitos del Esquistos El Pinal. Aflora en el límite poniente del acuífero, específicamente en la Sierra El Tigre, donde se encuentra subyaciendo a un paquete de rocas volcánicas ácidas. Hidrogeológicamente constituye una de las zonas de barrera al flujo del agua subterránea, y a profundidad forma el basamento hidrogeológico del acuífero confinado alojado en las rocas volcánicas.

#### **PALEOZOICO**

##### **Unidad Paleozoica 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.

#### **JURASICO SUPERIOR**

##### **Conglomerado Glance (JsKiCgp-Ar)**

Esta unidad forma parte del Grupo Bisbee, el cual engloba cuatro formaciones: Conglomerado Glance, Morita, Caliza Mural y Cintura. El Conglomerado Glance es una secuencia de rocas conglomeráticas que aflora en las faldas de la zona norte de la Sierra Escarate, fuera del área. Está constituido por conglomerados polimícticos poco rodados con algunos horizontes de

areniscas, de color de gris morado a café rosado-rojizo, con cantos de intrusivos y esquistos precámbricos, y en menor proporción, rocas volcánicas jurásicas, cuarcitas y calizas paleozoicas.

Por su grado de compactación se le asigna una permeabilidad predominantemente baja, aunque ocasionalmente, debido a la presencia de estructuras geológicas, incrementa su permeabilidad.

## **CRETÁCICO**

**Secuencia Indiferenciada (KiAr-Cz y KaCz-lu).** Se trata de una serie de rocas sedimentarias, marinas, indiferenciadas, correlacionables con el Grupo Bisbee. Litológicamente la secuencia en su mayoría está constituida por areniscas de cuarzo, arcosas, calizas, limolitas, lodolitas y escasos horizontes basales de conglomerados.

Aflora al norte de la Sierra del Tigre (sur de Huachinera), al norte de la Sierra Pitaycachi y en la Sierra Escarate. Sobreyace a rocas sedimentarias del Paleozoico, a la vez que es subyacida por rocas volcánicas predominantemente ácidas. Su permeabilidad es baja debido al alto grado de compactación, en zonas puntuales adquiere permeabilidad media debido al fracturamiento.

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 muy ocasionalmente 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.).

Aflora al norte de la Sierra El Tigre y en el extremo sur de La Sierra Pitaycachi. Sobreyace en la Sierra El Tigre a rocas sedimentarias del Paleozoico.

**Complejo Volcánico Inferior (KsTeA-Tq, KsTeR-TR, KsTpaA-Ar y KsTpgA-TA).** Es un grupo de rocas constituido principalmente por andesitas de color verde de textura afanítica, compacta, presentándose en algunas áreas como aglomerados andesíticos, tobas andesíticas porfídicas y variando en otras a dacitas, traquitas y riolitas, con escasas intercalaciones de areniscas, lutitas y calizas. Su espesor promedio es de 1500 m, aflora ampliamente en la porción occidente-suroccidente del área del acuífero. Es sobreyacida por la Secuencia Volcánica Ácida y está en contacto tectónico por fallamiento normal con el Conglomerado Báucarit. Se presenta fuertemente alterado y tectonizado, por lo que en superficie constituye zonas de recarga al acuífero. Localmente puede constituir acuíferos de bajo rendimiento.

**Batolito Laramide (KsTpg Gr-Gd, KsTpgPmz, KsTpgPA, KsTe Gd-D, TpaMz y ToPTq).** El Batolito Laramide se refiere a intrusivos cretácicos de composición granítico-granodiorítica, cuya forma y distribución está controlada por la erosión y eventos tectónicos posteriores, se encuentran expuesto al este del acuífero, en la sierra Hachita Hueca y al oriente de la Sierra Pitaycachi (noroeste del acuífero). Aunque sus afloramientos son de reducida dimensión, a profundidad constituye el basamento hidrogeológico del material fracturado con potencial acuífero.

**Secuencia Volcánica Ácida (ToR-TR y ToTR-Ig).** Rocas volcánicas representadas por tobas riolíticas, ignimbritas, riolitas, riodacitas y ocasionalmente pequeños domos riolíticos; que forman parte del evento volcánico Oligo-Miocénico que dio lugar a la formación de la Sierra Madre Occidental (McDowell y Clabaugh, 1979). Se trata de las rocas ampliamente distribuidas en el área, con espesor aproximado a los 1000 m. Debido a su fracturamiento, es una de las principales unidades que permiten la recarga del medio fracturado.

Se encuentra en contacto tectónico por fallamiento normal con grandes espesores de rocas andesítico-basálticas oligomiocénicas, afectado por pequeños cuerpos hipabisales de composición andesítica, traquítica y riolítica; también en contacto tectónico regional normal con la Formación Báucarit, y por fallas normales con rocas carbonatadas del Cretácico Inferior.

**Secuencia Volcánica Bimodal (TomB-TR, TomTR-B, TomTR y TmB).** Se refiere a una serie de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición basáltico-andesítica, intercaladas con tobas riolíticas e ignimbritas. Sus afloramientos más extensos se localizan en el sureste del acuífero y sus espesores sobrepasan los 500 m. Sobreyace a las secuencias volcánicas ácidas y es subyacente en depresiones por sedimentos del cuaternario. Por su fracturamiento intenso y abierto, se le asigna una permeabilidad que varía de media a alta media, constituyendo así una importante zona de recarga al acuífero.

**Formación Báucarit (Tm Cgp-Ar, TmCgp-B y TmB).** Definida por King en 1939, como una secuencia de areniscas, arcillas y conglomerados bien estratificados, ligeramente consolidados y en cuya parte inferior existen coladas de basaltos intercalados con aglomerados basálticos. Dentro de esta unidad se agrupa una secuencia de rocas volcánicas intermedias y básicas que están intercaladas con los conglomerados, también agrupa a un conglomerado polimíctico con clastos de basalto y andesitas basálticas. Sus afloramientos se concentran rellenando las depresiones causadas por la distensión terciaria. Hidrogeológicamente funciona como barrera natural (confinante) entre las rocas sedimentarias (acuífero en explotación) y las rocas fracturadas que posiblemente constituyan un acuífero a profundidad.

## **CUATERNARIO**

**Conglomerados Polimícticos del Pleistoceno (Qpt Cgp).** Unidad conglomerática polimíctica mal consolidada con escasos horizontes de limos y arenas. Los clastos están por lo general bien redondeados y son producto de la denudación detrítica de las rocas preexistentes formando terrazas y depósitos de talud; se distribuyen principalmente en la porción noreste del área; con espesores aproximados a 80 m.

Estos depósitos por lo general se encuentran cubriendo a la Formación Báucarit y unidades preterciarias y son cubiertos por depósitos aluviales de ríos, arroyos y planicies de inundación. Se trata de una unidad con permeabilidad alta debido a su composición y escasa consolidación.

**Basaltos (Qpt-B).** Se trata de rocas basálticas continentales ligadas a eventos tectónicos distensivos, mismos que dieron inicio en el Paleógeno y que aún están activos (Paz, 1985). La unidad aflora al este y suroeste del acuífero, fuera de sus límites. Su permeabilidad es alta.

**Gravas y Arenas (Qptgv-ar).** Depósitos de granulometría variada (grava, arena, limo y arcilla), con estratificación débilmente marcada a masiva. Estos depósitos se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades preexistentes, rellenando depresiones y cuencas actuales y son considerados de edad Pleistoceno Superior. Presentan permeabilidad alta.

**Depósitos lacustres (Qho la).** Unidad constituida de arcillas y limos depositados en zonas de lagunas marginales intermitentes; el color del material que constituye a estos depósitos varía de blanco a crema y se encuentran dispuestos en formas circulares. Por su composición tienen permeabilidad baja y constituyen zonas de barrera natural.

**Aluvión (Q al).** Son sedimentos del Holoceno producidos por el intemperismo de las rocas preexistentes y depositadas como abanicos aluviales y fluviales a lo largo de ríos, arroyos y planicies de inundación activas. Están constituidas por gravas de diferentes litologías, arenas y limos. Su permeabilidad es alta.

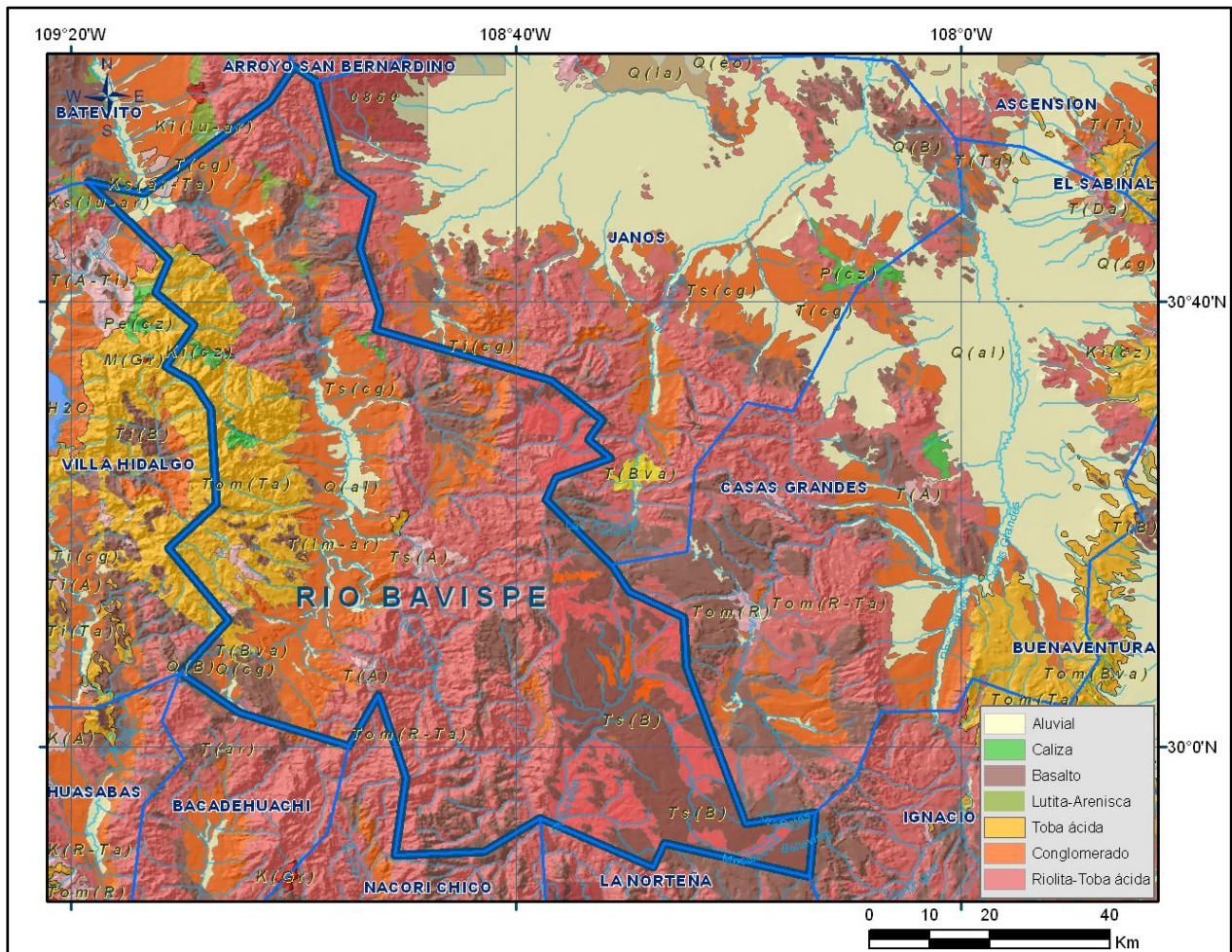


Figura 2. Mapa Geológico

#### 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 – Tardío, 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.

Se observan fallas normales con orientación preferente noroeste-sureste, así como fallas laterales con la misma orientación, en menor orientadas norte – sur. Las fracturas tienen orientación preferente noreste-suroeste, con una menor presencia de fracturas noroeste-sureste. Generalmente las fallas y fracturas constituyen los cauces de los principales arroyos, los cuales tienden a ser paralelos entre sí.

El fenómeno distensivo reciente es responsable de la Falla Pitaycachi, que ha sido generadora de sismos importantes al noroeste de México. Por otro lado, el evento distensivo Paleógeno se evidencia por el fallamiento normal de rumbo preferencial noroeste sureste, truncado por fallas con orientación noroeste suroeste.

En la zona se manifiestan evidencias de la Orogenia Laramide: intrusión de los batolitos de edad Cretácico-Paleógeno, plegamiento de gran radio de curvatura en las secuencias del Cretácico Superior y cabalgaduras de las secuencias precámbricas sedimentarias sobre la secuencia volcanosedimentaria de la Formación Tarahumara.

#### **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 60 y 100 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).

Las rocas conglomeráticas de la Formación Báucarit están afectadas por fallamiento escalonado y presentan permeabilidad prácticamente nula. Debido a que se localizan bajo los sedimentos recientes, provocan condiciones de confinamiento entre el material granular y el medio fracturado constituido por las unidades volcánicas de gran espesor.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1. Tipo de Acuífero**

El acuífero Río Bavispe es de tipo libre y está conformado, en su parte superior, por un medio granular caracterizado por la presencia de depósitos clásticos no consolidados y semi consolidados cuyas edades varían del Cenozoico al Cuaternario, se encuentran rellenando la zona del valle sobre el cual tiene su cauce el Río Bavispe. En la porción inferior del acuífero está emplazada la Formación Báucarit, la cual actúa como el basamento geohidrológico de dicho acuífero superficial (Figura 3). Los espesores de material aluvial se estiman en 40 metros y los conglomerados cuaternarios se consideran de unos 80 metros de espesor, según observaciones de campo. Cabe mencionar que de manera general fue estimado un espesor de 100 m para el acuífero granular.

La parte potencial del acuífero, es decir, la zona de la cual se extrae la mayor parte del agua subterránea, es el acuífero granular, localizado en las márgenes del Río Bavispe, el cual en esta zona fluye de sur a norte. De manera general, su comportamiento es de tipo libre, con excepción de aquellas zonas con predominio de los depósitos de la Formación Báucarit, cuyas unidades de material arcilloso y rocas volcánicas compactas crean condiciones de semiconfinamiento.

Las zonas de recarga se encuentran en las porciones topográficamente elevadas, donde existen condiciones adecuadas de permeabilidad que propicien la infiltración de agua de lluvia, formado principalmente por materiales de origen volcánico; riolitas, tobas riolíticas, basaltos, que posiblemente constituyan un acuífero potencial a mayor profundidad, en su caso, los cuerpos intrusivos forman el basamento geohidrológico del material volcánico.

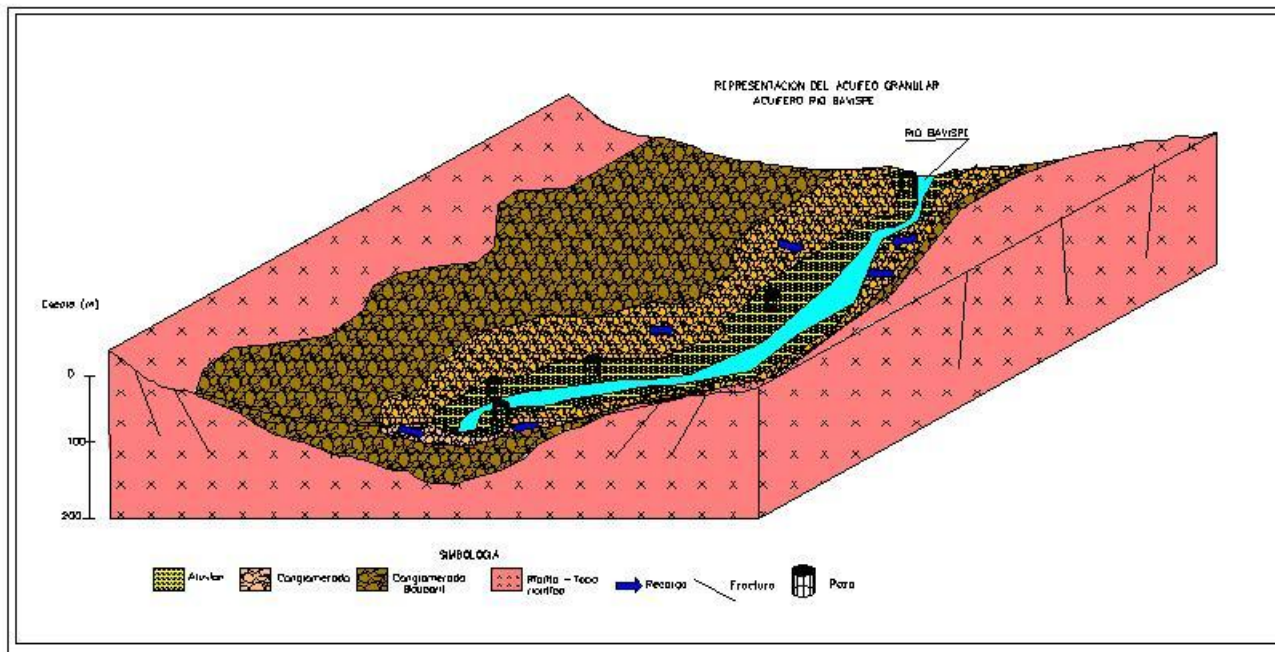


Figura 3. Modelo conceptual de funcionamiento acuífero

El acuífero constituye la principal fuente de abastecimiento para uso público de las comunidades Bacerac, Huachineras, Bavispe, San Miguelito, entre otras, además después del agua rodada, procedente del Río Bavispe, constituye la principal fuente de abastecimiento para uso agrícola.

## 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. Para el caso de la transmisividad se considera un valor promedio de  $4.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (350  $\text{m}^2/\text{día}$ ) y conductividad hidráulica de  $5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ .

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 ubicadas en la porción sur del acuífero, donde predomina la presencia de basaltos Cuaternarios, se utilizó un valor de 200  $\text{m}^2/\text{día}$  ( $2.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). En la zona central,

donde predomina materiales aluviales de granulometría predominantemente gruesa, fue estimado un valor de  $345 \text{ m}^2/\text{día}$  ( $4.00 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Tales valores se establecen con base en observaciones directas de campo en 2009, donde se hace referencia a material granular de permeabilidad alta con espesor aproximado de 100 m.

### **5.3. Piezometría**

De manera paralela al censo de aprovechamientos realizado en julio de 2008, se llevaron a cabo mediciones piezométricas en 56 aprovechamientos, de los cuales 54 corresponden a norias y 2 pozos

### **5.4. Comportamiento Hidráulico**

El acuífero presenta un comportamiento hidráulico dinámico, debido a que el agua subterránea se infiltra en las porciones altas del acuífero, constituidas por rocas volcánicas fracturadas que favorecen una rápida circulación de agua de reciente infiltración proveniente de la lluvia, hacia la zona de valle, donde se realiza actualmente la explotación.

En el acuífero existen tres principales zonas de recarga a través de flujos subterráneos horizontales, una ubicada al sur del acuífero donde el agua se infiltra en rocas volcánicas, predominantemente basálticas y las dos restantes localizadas en la porción centro oriental.

En la zona de valle también tiene lugar recarga vertical producto de precipitaciones y de retorno de riego agrícola.

La descarga artificial del acuífero se lleva a cabo mediante bombeo, mientras que la descarga natural se realiza en forma del flujo horizontal al norte del acuífero, por el cauce y zona de influencia del Río Bavispe, así como a través de manantiales y mediante el proceso de evapotranspiración en zonas con niveles piezométricos someros con presencia de abundante vegetación. Debido a que no se dispone de información piezométrica histórica, únicamente se describirá la configuración del nivel estático para el año 2008.

#### **5.4.1. Profundidad al Nivel Estático**

La profundidad al nivel estático para el acuífero varía de 0.60 a 9.70 m, registrándose los valores más profundos en las inmediaciones del Rancho El Papalote, ubicado al suroeste de Huachinera, y los niveles más someros a lo largo del cauce de los ríos Bavispe y Huachinera.

Hacia el poblado Tamichopa la profundidad varía de 5.0 a 7.5 m y 8.0; en tanto que en la zona de San Miguelito alcanza los 8 m. De manera general las profundidades someras están influenciadas por los cauces de los Ríos Bavispe y Huachinera. (Figura 4).

A lo largo del cauce del Río Bavispe, el cual fluye de sur a norte, en la región central del acuífero, se presentan de manera general profundidades someras de 0.6 a 4.0 m, mientras en el Río Huachinera las profundidades oscilan de 1.1 a 4.6 m; por último en la región del pequeño valle de Aribabi, localizado al sur del acuífero, las profundidades están del orden de 1.0 a 4.5 m.

#### **5.4.2. Elevación del Nivel Estático**

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para el 2008 (Figura 5), presenta elevaciones que varían de 950 hasta 1490 msnm. Elevaciones de 1200 a 1490 msnm se presentan hacia las zonas topográficamente más altas, localizadas al sur del acuífero, en las inmediaciones del poblado de Aribabi. De igual manera, elevaciones entre 1060 y 1140 se registran en las inmediaciones del Río Huachinera. Sobre las márgenes del Río Bavispe se registran las menores elevaciones, las cuales varían desde 950 hasta 1020 msnm. De esta manera es posible identificar que la dirección de flujo subterráneo muestra una trayectoria preferencial sur-norte, con alimentaciones laterales provenientes de las sierras que delimitan los valles. La mayor elevación se registra en Aribabi (1490 msnm), y el menor en el poblado Colonia Morelos (835 msnm), ubicado en el extremo norte del acuífero.

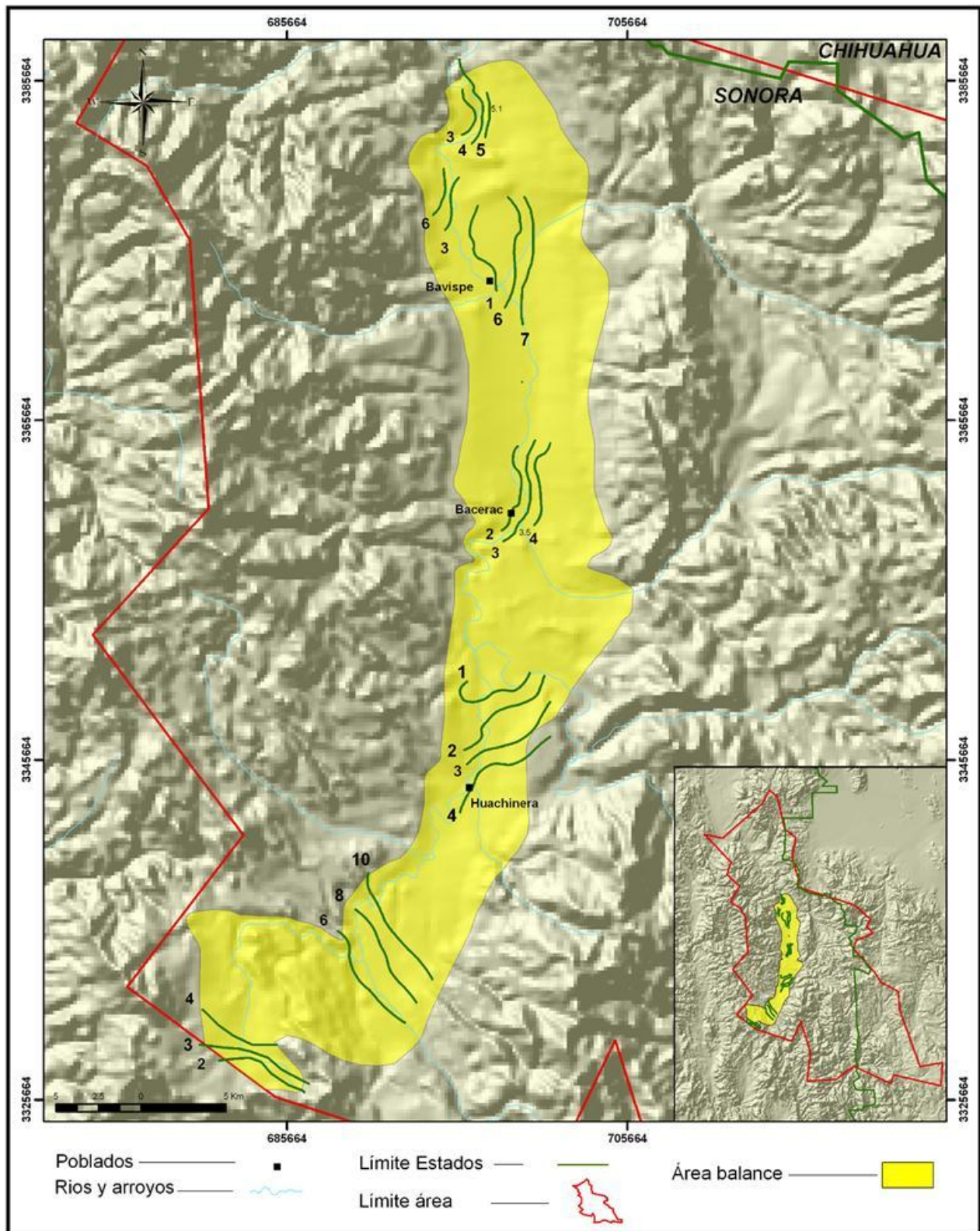


Figura 4. Profundidad al Nivel Estático en m (2008) y zona de balance

20

### **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 esto, 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.

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**

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2008, se tomaron lecturas in situ de algunos parámetros físicos y químicos en 56 aprovechamientos de aguas subterráneas, correspondiendo a 55 norias y 1 manantial. Las determinaciones incluyeron, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de lecturas de parámetros físicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) no superan los 300 mg/l, por lo que el agua es de buena calidad, de manera general apta para el consumo humano y para todo uso. La distribución espacial a lo largo de todo el acuífero es menor a 200 mg/l, las concentraciones superiores a este valor se restringen a la zona de La Cueva y El Membrillo. Respecto a los valores de conductividad eléctrica, sus valores oscilan entre 67.4 a 609  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La temperatura de los aprovechamientos es homogénea a lo largo del acuífero con valores de 20 a 30° C de manera general. Los valores de pH oscilan entre 6.5 y 8.5, con excepción de n la zona conocida como La Cueva y El Membrillo, donde el pH es superior a 8, lo cual posiblemente esté asociado a aguas bicarbonatadas de mayor tiempo de residencia y que hayan circulado por rocas calizas de edad Devónico-Pérmico, las cuales forman parte de la Sierra Hachita Hueca.

No se descarta la presencia de metales pesados, en su caso estarían asociados a procesos geológicos y mineralógicos locales.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en 2008, se registró la existencia de 68 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 63 son norias, 4 pozos y un manantial. Del total, 52 aprovechamientos se encuentran activos, de los cuales 50 son norias, 1 pozo y un manantial.

El valor de la extracción asciende a los 15.2 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 11.7 (77%) se destina al sector agrícola, 0.1 hm<sup>3</sup> (0.6%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero, 2.1 hm<sup>3</sup> más (13.8%) para abastecimiento del uso público-urbano, y los 1.3 hm<sup>3</sup> restantes (8.6%) para usos múltiples.

El volumen de extracción se cuantificó de manera directa cuando los pozos contaban con medidor de flujo, o través de la información recabada en campo durante el censo, tiempo de operación, superficie regada, láminas de cultivo y estimaciones de acuerdo a las características de las obras.

## 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 en una superficie de 518 km<sup>2</sup> que corresponde a la zona donde se localizan 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 están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

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

### 7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

### 7.1.1. Recarga Vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv: Recarga vertical
- Eh: Entradas por flujo horizontal
- Ri: Recarga inducido
- B: Bombeo
- Sh: Salidas por flujo horizontal
- ETR: Evapotranspiración real en niveles someros
- Dn: Descarga natural
- $\Delta V(S)$ : Cambio en el volumen almacenado

### 7.1.2. Recarga Inducida (Ri)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego, tanto de origen subterráneo como superficial, ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o de alcantarillado.

La recarga inducida o retorno de riego del agua de origen subterráneo se determinó en función del volumen que se extrae del acuífero para uso agrícola. De manera general se estimó que un 20% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida. De acuerdo a la hidrometría estimada por SGM, en el acuífero Río Bavispe se utilizan 11.7 hm<sup>3</sup>/año para uso agrícola, por lo cual se consideró **2.3 hm<sup>3</sup>/año** como un volumen representativo de recarga inducida por retornos de riego de agua de origen subterráneo.

Adicionalmente, también se utiliza un volumen de agua superficial de  $12.3 \text{ hm}^3/\text{año}$  del Río Bavispe, a través de plantas derivadoras, por medio de un sistema de canales, algunos de ellos revestidos. Por lo tanto, tomando en cuenta que el 20 % de este volumen se infiltra al acuífero, se obtiene un valor de  **$2.5 \text{ hm}^3/\text{año}$** , que incluye las filtraciones a lo largo de los canales que no están revestidos.

Por lo tanto la recarga inducida es la suma de lo que se infiltra de agua subterránea y agua superficial, resultando un volumen de  **$4.8 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

### 7.1.3 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 2009 (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 ( $\Delta h$ ). 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 ( $\Delta h / \Delta L$ )  $\Delta h$  y  $\Delta L$  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:

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

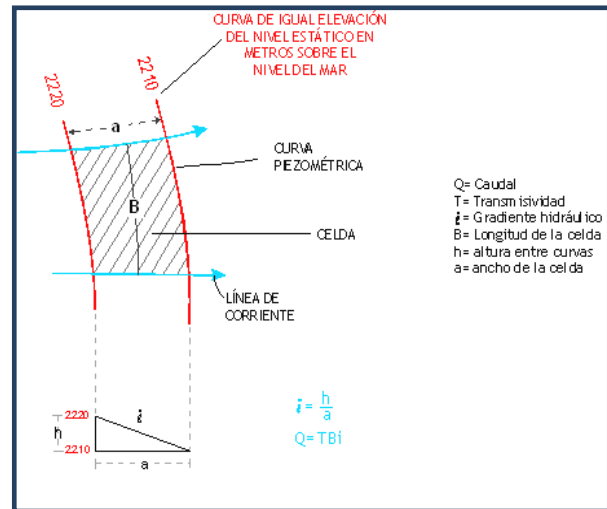
Donde:

$T$  = 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:

$$T = K b$$

Se identificaron 6 celdas de flujo de entrada al acuífero, las cuales se observan en la Figura 6. El valor de transmisividad utilizado fue estimado con base en las características de la geología del subsuelo y el espesor saturado de la zona, siendo este de  $200 m^2/día$  ( $2.31 \times 10^{-3} m^2/s$ ) hacia las estribaciones de la zona serrana y de  $345 m^2/día$  ( $4.00 \times 10^{-3} m^2/s$ ) en la zona de valle.

El cálculo del volumen de entrada subterránea a la zona de influencia del balance planteado en la zona de valle es de **21.0  $hm^3/año$**  (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                    | 1875           | 545         | 10          | 0.0183      | 0.0023      | 0.0791               | 2.5                    |
| E2                    | 1755           | 545         | 10          | 0.0183      | 0.0023      | 0.0741               | 2.3                    |
| E3                    | 5170           | 1204        | 10          | 0.0083      | 0.0040      | 0.1718               | 5.4                    |
| E4                    | 3530           | 1318        | 10          | 0.0076      | 0.0040      | 0.1071               | 3.4                    |
| E5                    | 3239           | 815         | 10          | 0.0123      | 0.0040      | 0.1590               | 5.0                    |
| E6                    | 2463           | 1292        | 10          | 0.0077      | 0.0040      | 0.0763               | 2.4                    |
| <b>Total entradas</b> |                |             |             |             |             |                      | <b>21.1</b>            |

## 7.2. Salidas

Las descargas del acuífero están representadas por la evapotranspiración real (ETR), las salidas horizontales (Sh), las descargas naturales (Dn) y el bombeo (B).

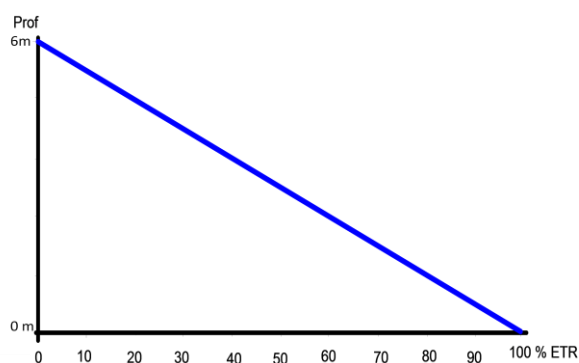
### 7.2.1. Evapotranspiración real (ETR)

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).

El cálculo de la evapotranspiración corresponde a la pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 8 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 8 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 6 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 6 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 3 m el 50%, etc.

Existe una zona del área de balance de 40 km<sup>2</sup> de superficie, donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 6 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de la vegetación típica de la zona. Se aplicó la fórmula de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 431 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 19.7° C y precipitación de 440 mm.

|                  |                                                                               |            |                           |            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|------------|
| Fórmula de Turc: | $ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left( \frac{P^2 (mm)}{L^2} \right)}}$ |            | $L = 300 + 25T + 0.05T^3$ |            |
|                  | T (°C) =                                                                      | 19.7       |                           |            |
|                  | P(mm) =                                                                       | 440        | P <sup>2</sup> =          | 193600     |
|                  | L =                                                                           | 1174.76865 | L <sup>2</sup> =          | 1380081.38 |
|                  | ETR (mm)                                                                      | 431.4      |                           |            |



Con estas consideraciones se elaboró la tabla 3, en la que se puede observar que el valor de la evapotranspiración asciende a **9.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 3. Estimación de la evapotranspiración

| Intervalo curvas (m) | Profundidad (m) | Area (km <sup>2</sup> ) | %    | ETR (m) | Vol ETR (hm <sup>3</sup> /año) |
|----------------------|-----------------|-------------------------|------|---------|--------------------------------|
| 0.1 a 1              | 0.5             | 12.1                    | 0.92 | 0.431   | 4.8                            |
| 1 a 2                | 1.5             | 5.4                     | 0.75 | 0.431   | 1.7                            |
| 2 a 3                | 2.5             | 6                       | 0.58 | 0.431   | 1.5                            |
| 3 a 4                | 3.5             | 5.5                     | 0.42 | 0.431   | 1.0                            |
| 4 a 5                | 4.5             | 4                       | 0.25 | 0.431   | 0.4                            |
| 5 a 6                | 5.5             | 7                       | 0.08 | 0.431   | 0.2                            |
| <b>Total</b>         |                 |                         |      |         | <b>9.7</b>                     |

### 7.2.2. Bombeo (B)

De acuerdo con los resultados de la hidrometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **15.2 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.2.3. Salidas subterráneas (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma forma que se calcularon las entradas a partir de la configuración del nivel estático para 2009 (Figura 5). El valor estimado fue de **4.3 hm<sup>3</sup>/año** (tabla 4), calculado al sur del poblado La Morita.

Tabla 4. Cálculo de salidas horizontales

| CANAL                | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | $h_2-h_1$ | Gradiente i | T                   | CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año) |
|----------------------|----------------|-------------|-----------|-------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|
|                      |                |             | (m)       |             | (m <sup>2</sup> /s) |                              |                                |
| S1                   | 3347           | 1415        | 10        | 0.0071      | 0.0058              | 0.1372                       | 4.3                            |
| <b>Total salidas</b> |                |             |           |             |                     |                              | <b>4.3</b>                     |

#### 7.2.4. Descargas naturales por manantiales (Dn)

Para el caso del acuífero Río Bavispe se consideró sólo el volumen de agua que emana de un manantial censado dentro del área de balance, sin tomar en cuenta otros ubicados en zonas topográficamente altas de la Sierra Madre Occidental que no tienen relación hidráulica con el valle. El volumen estimado es de **0.5 hm<sup>3</sup>/año**.

#### 7.3. Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica histórica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo  **$\Delta V(S) = 0$** .

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

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 4.3 + 15.2 + 9.7 + 0.5 - 0 - 21.0 - 4.8$$

$$R_v = 3.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a  $R_t = R_v + E_h + R_i$

$$R_t = 3.9 + 21.0 + 4.8$$

$$R_t = 29.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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 indica 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:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPD

### 8.1. Recarga Total Media Anual

La recarga total media anual que recibe el acuífero ( $R_t$ ), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para el caso del acuífero Río Bavispe la recarga total media anual es de **29.7 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 24.9 hm<sup>3</sup> son recarga natural y los 4.8 hm<sup>3</sup> restantes corresponden a la recarga inducida.

### 8.2. Descarga Natural Comprometida

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

Para el caso del Acuífero Río Bavispe su valor es de 0.5 hm<sup>3</sup> anuales que corresponden a la descarga de los manantiales. No se consideran comprometidas las salidas horizontales debido a que fueron calculadas en una zona muy distante con respecto a los límites con otros acuíferos.

**Dn = 0.5 hm<sup>3</sup> anuales**

## 8.1 Volumen Concesionado de Aguas Subterráneas

El volumen anual de la extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al 31 de marzo de 2009, es de **23,900,699 m<sup>3</sup>/año**.

## 8.2 Disponibilidad de Aguas Subterráneas

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 REPDa, que de acuerdo con la expresión (3) resulta:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

$$5.299301 = 29.7 - 0.5 - 23.900699$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **5'299,301 m<sup>3</sup>** 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 su 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 volcánicas 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, se podrá hacer una evaluación posterior.

## **9 BIBLIOGRAFÍA**

INEGI, 1993. Estudio Hidrológico del Estado de Sonora.

Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, 2008. Actualización Hidrogeológica de los Acuíferos del Río Yaqui, Mátape, Sonora. Hermosillo, Sonora.