



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO YÉCORA (2649) ESTADO DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. GENERALIDADES.....</b>                                  | <b>2</b>  |
| <b>Antecedentes .....</b>                                     | <b>2</b>  |
| 1.1. Localización.....  | 2         |
| 1.2. Situación administrativa del acuífero.....               | 4         |
| <b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b> | <b>5</b>  |
| <b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>                                    | <b>5</b>  |
| 3.1 Provincia fisiográfica.....                               | 5         |
| 3.2 Clima.....  | 6         |
| 3.3 Hidrografía.....  | 7         |
| 3.4 Geomorfología.....  | 7         |
| <b>4. GEOLOGÍA.....</b>                                       | <b>8</b>  |
| 4.1 Estratigrafía.....  | 8         |
| 4.2 Geología estructural .....                                | 15        |
| 4.3 Geología del subsuelo.....                                | 15        |
| <b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>                                  | <b>16</b> |
| 5.1 Tipo de acuífero.....                                     | 16        |
| 5.2 Parámetros hidráulicos.....                               | 17        |
| 5.3 Piezometría.....  | 17        |
| 5.4 Comportamiento hidráulico.....                            | 18        |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático.....                      | 18        |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático.....                       | 19        |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático.....                       | 20        |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....      | 20        |
| <b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>       | <b>20</b> |
| <b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>                  | <b>21</b> |
| 7.1 Entradas.....   | 21        |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv).....                              | 22        |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....     | 22        |
| 7.2 Salidas .....   | 24        |
| 7.2.1 Evapotranspiración Real (ETR) .....                     | 24        |
| 7.2.2 Extracción por bombeo (B).....                          | 26        |
| 7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....     | 26        |
| 7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ) .....            | 26        |
| <b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>                                | <b>27</b> |
| 8.1 Recarga total media anual (R).....                        | 28        |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....                  | 28        |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....   | 28        |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 29        |
| <b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                  | <b>30</b> |

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

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

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

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

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

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

### **1.1. Localización**

El acuífero Yécora, definido con la clave 2649 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción este del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 28° 14' y 29° 05' de latitud, y 108° 17' y 109° 02' de longitud, cubriendo una superficie de 3578 km<sup>2</sup>. Limita al norte y éste con el acuífero Nacori Chico, al sur con San Bernardo y al oeste con Río Sahuaripa (figura 1).

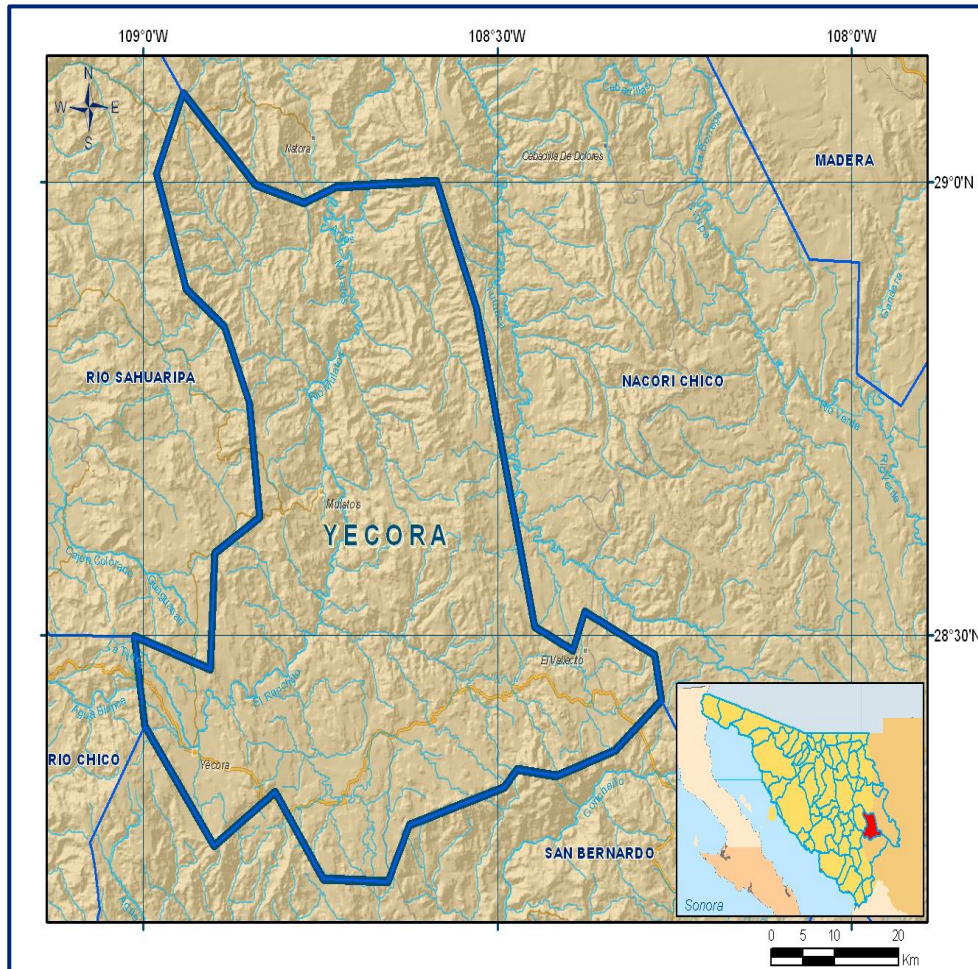


Figura 1. Localización del Acuífero

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Yécora y Sahuaripa en el Estado de Sonora, mientras que en el Estado de Chihuahua se ubica en los municipios Madera, Moris y Temósachi.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

| ACUIFERO 2649 YECORA |                |         |          |               |         |          |
|----------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| VERTICE              | LONGITUD OESTE |         |          | LATITUD NORTE |         |          |
|                      | GRADOS         | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS        | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1                    | 108            | 31      | 45.8     | 28            | 51      | 40.9     |
| 2                    | 108            | 26      | 50.1     | 28            | 30      | 33.3     |
| 3                    | 108            | 23      | 35.8     | 28            | 29      | 2.9      |
| 4                    | 108            | 22      | 38.3     | 28            | 31      | 36.2     |
| 5                    | 108            | 16      | 42.4     | 28            | 28      | 41.0     |
| 6                    | 108            | 16      | 9.5      | 28            | 25      | 43.1     |
| 7                    | 108            | 20      | 4.9      | 28            | 22      | 23.2     |
| 8                    | 108            | 24      | 57.9     | 28            | 20      | 44.7     |
| 9                    | 108            | 28      | 20.5     | 28            | 21      | 9.3      |
| 10                   | 108            | 29      | 26.2     | 28            | 19      | 58.1     |
| 11                   | 108            | 37      | 28.0     | 28            | 17      | 27.5     |
| 12                   | 108            | 39      | 17.5     | 28            | 13      | 45.8     |
| 13                   | 108            | 44      | 46.1     | 28            | 13      | 54.0     |
| 14                   | 108            | 48      | 49.7     | 28            | 19      | 39.0     |
| 15                   | 108            | 53      | 59.1     | 28            | 16      | 8.2      |
| 16                   | 108            | 59      | 51.4     | 28            | 24      | 3.3      |
| 17                   | 109            | 0       | 45.9     | 28            | 29      | 57.4     |
| 18                   | 108            | 54      | 18.8     | 28            | 27      | 48.3     |
| 19                   | 108            | 53      | 56.7     | 28            | 35      | 25.8     |
| 20                   | 108            | 50      | 9.7      | 28            | 37      | 50.2     |
| 21                   | 108            | 51      | 0.6      | 28            | 45      | 22.0     |
| 22                   | 108            | 53      | 8.6      | 28            | 50      | 26.9     |
| 23                   | 108            | 56      | 22.0     | 28            | 52      | 56.9     |
| 24                   | 108            | 58      | 52.5     | 29            | 0       | 32.3     |
| 25                   | 108            | 56      | 37.9     | 29            | 5       | 49.6     |
| 26                   | 108            | 50      | 28.3     | 28            | 59      | 45.4     |
| 27                   | 108            | 46      | 21.9     | 28            | 58      | 37.0     |
| 28                   | 108            | 43      | 40.4     | 28            | 59      | 40.0     |
| 29                   | 108            | 35      | 8.4      | 29            | 0       | 19       |
| 1                    | 108            | 31      | 45.8     | 28            | 51      | 40.9     |

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El Acuífero Yécora pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio no se encuentra sujeto a las disposiciones de decretos de veda.

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

Aunque el volumen de extracción es incipiente, los usos principales son para abastecimiento de agua potable y doméstico-abrevadero. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En el área que comprende el acuífero Yécora se han realizado numerosos estudios de investigación geológica y de exploración minera. Con respecto a estudios hidrogeológicos se han desarrollado algunos a escala regional, de los cuales a continuación se citan los más importantes:

**PANORAMA GEOHIDROLÓGICO DEL ESTADO DE SONORA** realizado en 1991 por Daniel Alberto Arámbula, Julio César Palomino Montero. Establece un panorama general de las condiciones geohidrológicas del Estado de Sonora.

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ESTADO DE SONORA**, realizado en el 2007 por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Al igual que el estudio antes citado, se describen de manera general las condiciones geohidrológicas de la zona. En lo que al área se refiere, se establece que no existen condiciones de sobreexplotación acuífera.

**ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA**, realizado en 2008 por el Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, llevó a cabo el estudio, cuyo objetivo fue realizar una evaluación hidrogeológica preliminar de los acuíferos de estas cuencas, para determinar su recarga media anual y su disponibilidad. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

## **3. FISIOGRAFÍA**

### **3.1 Provincia fisiográfica**

El acuífero Yécora se encuentra enclavado en la provincia de la Sierra Madre Occidental, en las subprovincias Sierra Alta y Valle, y Sierras y Valles del Norte, INEGI (1997). Está formado principalmente por sierras cuyos rasgos orográficos tienen elevaciones entre 1000 y 2000 msnm, que presentan laderas escarpadas, entre las cuales se localiza un pequeño valle intermontano, único en el acuífero, donde se ubica la comunidad Yécora. Las rocas que afloran tienen una composición predominantemente volcánica ácida y en menor proporción rocas basálticas dispuestas en franjas orientadas en preferente norte-sur.

La Subprovincia Sierra Alta y Valle cubre prácticamente todo el acuífero, en tanto que la Subprovincia Sierras y Valles del Norte ocupa el extremo noroeste, abarcando una pequeña porción del acuífero y en ella predominan los valles intermontanos con lomeríos.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de climas del INEGI (2007), en el acuífero se presentan cuatro tipos de climas.

Semiseco Semicálido BS1h (x'): Presenta una temperatura anual mayor a los 18° C, con temperatura del mes más frío menor a 18° C. La temperatura del mes más cálido es de 22° C, con lluvias que se presentan durante todo el año, con un porcentaje de lluvias invernal mayor al 18% del total anual.

Semiseco templado BS1k (x'): Presenta una temperatura anual entre 12 y 22° C, con una temperatura del mes más frío entre -3 a 10° C. La temperatura del mes más cálido es menor a los 25°C; con lluvias de verano y porcentaje de lluvias invernales mayor al 18% del total anual.

Templado, subhúmedo con humedad media C (w1) x': Presenta una temperatura anual entre 12 y 22°C, con precipitación media anual que varía de 800 a 1000 mm. La lluvia invernal, es decir, la ocurrida en los meses de enero, febrero y marzo, representa más del 10.2% de la precipitación total anual.

Semifrío, subhúmedo con verano fresco y humedad media Cb (w1) x': Presenta una temperatura media anual entre 5° C y 12° C. La precipitación total 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.

El análisis climatológico se realizó con base en los datos de tres estaciones climatológicas ubicadas dentro de los límites del acuífero, en las comunidades Maycoba, Mulatos y Yécora, las cuales presentan un periodo de registro de datos de 1961 a 2007.

El valor de la temperatura media anual es de 14.1° C, el valor de la precipitación media anual registrada en el área es de 749.50 mm, se calculó una evaporación potencial del orden de 1578 mm.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se encuentra ubicado dentro de la Región Hidrológica 9, Sonora Sur (RH-9), la cual ocupa la mayor superficie en el Estado de Sonora (63%), extendiéndose principalmente en su porción oriental, desde Agua Prieta hasta la comunidad Yávaros, prolongándose al extremo occidente del Estado de Chihuahua. Tiene un relieve con fuertes contrastes altimétricos, la mayoría de sus corrientes nacen en la Sierra Madre Occidental y la integran las siguientes cuencas: Río Mayo, Río Yaqui, Río Mátape, Río Sonora y Río Bacoachi. Cabe mencionar que el acuífero queda enmarcado en la Cuenca del Río Yaqui.

La principal corriente superficial de la zona es el Río Mulatos, de tipo perenne, que fluye predominantemente en dirección norte sur, al cual se le unen los ríos Pedregoso y Maycoba, también con dirección preferente norte sur, para después flexionarse al poniente hasta desembocar en la Presa Plutarco Elías Calles (El Novillo).

En la zona predomina drenaje radial, seguido del tipo paralelo y en una menor proporción drenaje dendrítico. A los cauces principales se le unen una serie de tributarios de régimen intermitente, destacando los arroyos Yécora y Sirupa, entre otros.

En la región que cubre el acuífero no existe infraestructura hidráulica para el almacenamiento del agua superficial.

### **3.4 Geomorfología**

La geomorfología del área corresponde al ciclo de juventud avanzada, que se denota por las reducidas distancias de una elevación a otra. Predomina un sistema orográfico típicamente montañoso, de grandes desniveles, drenaje superficial con pendientes altas y valles estrechos en forma de garganta.

Se presentan elevaciones que varían desde los 800 a 2600 msnm. Elevaciones máximas (entre 2300 y 2600 msnm) se encuentran localizadas en la porción sur – occidental del acuífero, en la zona de Boquilla Perlita y Piedras Azules, mientras que elevaciones mínimas (entre 800 y 1200 msnm) se localizan al norte del acuífero, en la Sierra La Pitahaya y el Río Mulatos. En el Valle de Yécora se presenta una elevación promedio de 1600 msnm.



#### 4. GEOLOGÍA

El área presenta un contexto geológico variado, abarcando edades desde el Precámbrico al Reciente.

A continuación, se hace una breve descripción en orden cronológico de las unidades que afloran en la zona, cuya distribución se observa en la Figura 2.

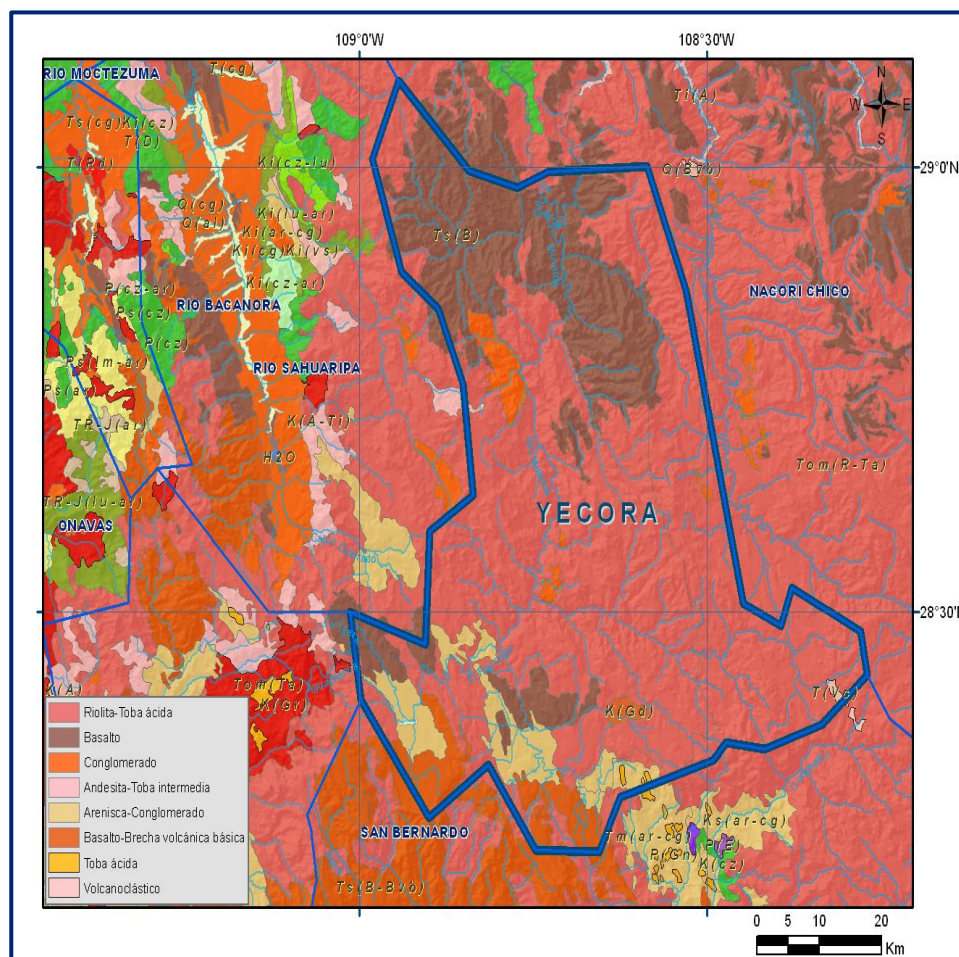


Figura 2. Geología general del acuífero

La descripción de la unidad litológica está basada en la información de las cartas geológico mineras Madera y Tecoripa (H12-9 y H12-12) escala 1:250,000, editadas por el extinto Consejo de Recursos Minerales (ahora Servicio Geológico Mexicano).

##### 4.1 Estratigrafía

La secuencia de rocas expuestas en la región se menciona a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

### **Rocas Precámbricas**

pTs(?)Ar-Do.- Se trata de rocas del Precámbrico Superior, principalmente limolitas, dolomías, areniscas de cuarzo, calizas y en menor proporción conglomerados y lutitas, que aflora en una secuencia con espesor superior a los 2000 m, fuera de los límites del acuífero. Por sus características naturales y el escaso fracturamiento, se consideran de permeabilidad baja.

pTm(?)Gr-Gn.- Unidad precámbrica formada por rocas intrusivas graníticas. Afloran al extremo sur del área, fuera de los límites del acuífero. Por su litología, compactación y escaso fracturamiento, presenta muy baja permeabilidad; junto con la unidad anterior, se consideran el basamento hidrogeológico del acuífero.

### **Rocas Paleozoicas**

Secuencia sedimentaria del Paleozoico Superior (Pdp Cz-Ar). Se trata de una secuencia constituida por calizas de plataforma, con abundante presencia de corales, crinoides y fusulínidos, textura tipo mudstone y packstone, con intercalaciones de areniscas, lutitas y calcoarenitas. Intemperiza en color amarillo ocre y rojizo, su espesor varía desde centímetros hacia la base, hasta la decena de metros hacia la cima. Aflora al poniente, fuera de los límites del acuífero. Por su fracturamiento moderado se le asigna una permeabilidad que varía de media a baja.

### **Rocas Mesozoicas**

Secuencia Metasedimentaria Jurásica (Js?Mar-MLu). Compuesta por areniscas de cuarzo y lutitas metamorfoseadas. En su base se observan cuarcitas y esquistos con foliación preferencial noreste-suroeste, mientras que en la parte superior se observan intercalaciones de lentes conglomeráticos con metamorfismo incipiente y cantos de areniscas de cuarzo y algunos lentes de calizas recristalizadas y lutitas calcáreas con espesores no mayores de 50 m, así como escasos horizontes de rocas volcánicas intermedias. Se estima que su espesor es mayor a los 1000 m.

La secuencia subyace discordantemente a las rocas del Complejo Volcánico Inferior y está en contacto tectónico por falla normal con una secuencia volcánica bimodal de edad que varía del Oligoceno al Mioceno, además de rocas ácidas del Oligoceno e intermedias del Cretácico Superior. Aflora al sur del área, fuera de los límites del acuífero. Por sus condiciones de fracturamiento e intemperismo presenta una permeabilidad que varía de media a baja.

Secuencia Volcanosedimentaria Jurásica. JsVs. Secuencia de lutitas y calizas de color café, dispuesta en estratos delgados, andesitas interestratificadas y aglomerados con horizontes de lutitas fosilíferas con fauna albiana. La secuencia está dividida en dos unidades: 1) Unidad Inferior que consiste de aglomerados en la base e interestratificaciones de tobas, areniscas, caliza, lutitas y limolitas, con dique-estratos de andesitas. 2) Unidad Superior que consiste de intercalaciones de lutitas, limolitas y areniscas con escasas intercalaciones de tobas y diques andesíticos.

Por su contenido de material fino y su alto grado de compactación se asigna una permeabilidad baja. Sus afloramientos predominan en el extremo sur del área, fuera de los límites del acuífero.

Grupo Bisbee (KiLu-Ar). Se compone de cuatro formaciones: Conglomerado Glance, Morita, Caliza Mural y Cintura. De manera general el Grupo Bisbee está constituido por lutitas, areniscas y calizas con alto contenido en fósiles, con espesor total aproximado de 600 m. Se encuentra sobreyaciendo a la secuencia volcanosedimentaria del Jurásico Superior y subyacida por conglomerados y basaltos terciarios. La permeabilidad de estas rocas es variable, desde media en zonas con presencia de fracturamiento moderado, a baja en zonas con fracturamiento escaso o relleno de materiales secundarios.

Complejo Volcánico Inferior (KsA-Ar, KsA-Tq, KsATA,).- Se trata de un complejo de rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica, y volcanosedimentarias de edad Cretácica, de igual manera de unidades volcanoclásticas de andesita - toba andesítica (KsA-TA), afloran en el arroyo Sahuayacán (sureste de Yécora) y al sur de la comunidad Santa Rosa (este de Yécora). Las unidades volcanosedimentarias andesita - arenisca (KsA-Ar) se localizan al oriente del acuífero, mientras que al norte afloran rocas andesíticas traquíticas y riodacíticas (KsA-Tq).

En conjunto las unidades pueden alcanzar un espesor de al menos 1,500 m.

Las principales relaciones estratigráficas de estas rocas son con las rocas sedimentarias paleozoicas, ya sea sobreyaciéndolas discordantemente ó por contacto tectónico normal y en algunos casos es cabalgada por las unidades paleozoicas. En su mayoría estas formaciones presentan con fracturamiento que varía de moderado a bajo, por lo cual se considera que operan como una zona de recarga al acuífero.

## **Rocas Cenozoicas**

Rocas Volcánicas (TeoA-TA), Esta formación pertenece al Eoceno-Oligoceno, está constituida principalmente por andesitas, dacitas, areniscas, tobas andesíticas y dacíticas, las cuales afloran en la porción centro occidental del acuífero, al norte del poblado Yécora y en el extremo sur del acuífero. Forman parte importante de las rocas por donde circula el agua a profundidad en el acuífero, constituyendo así una zona de recarga.

Sus relaciones estratigráficas principales son con grandes afloramientos de rocas volcánicas ácidas del Oligoceno constituidas por tobas riolíticas, riolitas e ignimbritas que la sobreyacen discordantemente.

Conglomerado Navosaygame Teo Cgp-Ar. Se utiliza el nombre informal Conglomerado Navosaygame para definir a una unidad sedimentaria continental constituida por una secuencia de conglomerados polimícticos y litarenitas de color rojo oscuro de grano fino a medio.

El conglomerado está formado por clastos volcánicos, cuarcitas y rocas calcáreas, presentándose de forma subredondeada a angulosa y en algunas ocasiones, en forma de brecha sedimentaria.

Sobreyace discordantemente a rocas del Grupo Volcánico Inferior, representadas por unidades andesíticas del Cretácico Superior, además de secuencias representadas por unidades volcanosedimentarias (Js Vs), lutitas y margas del Jurásico Superior (Js Mar-Mlu). Subyacen discordantemente a rocas volcánicas del Grupo Volcánico Superior y al conglomerado de la Formación Báucarit (ToTR-R y TmCgp-Ar).

Estas rocas afloran al sur del acuífero y presentan permeabilidad media debido a su fracturamiento moderado.

Secuencia Volcánica Ácida ToTR-R.- Secuencia de rocas volcánicas representadas por tobas riolíticas ignimbritas, riolitas, riodacitas y ocasionalmente pequeños domos riolíticos, que tienden a formar largas mesetas de orientación noroeste-sureste. Son las rocas que mayor presencia tienen en el acuífero, con un espesor superior a los 1000 m. La secuencia se encuentra descansando discordantemente sobre las rocas volcánicas y volcanoclásticas intermedias del Complejo Volcánico Inferior.

En la región de Movas, ubicada al occidente del acuífero, sobreyace discordantemente a rocas volcánicas correlacionables con la Formación Tarahumara. Se encuentran en contacto por falla con el Conglomerado Báucarit y sobreyacido por basaltos y andesitas basálticas del Mioceno.

La secuencia tiene una permeabilidad media, esto debido a la presencia de fracturamiento moderado cuando las fracturas no están rellenas; de igual forma se encuentra afectada por un sistema de fallas orientado en varias direcciones, que le confiere condiciones de permeabilidad media.

Secuencia Volcánica Básica ToA-B.- Se trata de una secuencia de rocas representadas por andesitas basálticas, basaltos, aglomerados basálticos y andesitas, con ocasionales intercalaciones de tobas riolíticas, dacíticas, riolíticas y areniscas tobáceas. Estas rocas afloran en la porción central y norte del acuífero, conformando potentes unidades de hasta 500 m de espesor con orientación noroeste – suroeste.

Su permeabilidad varía de media a baja, en función de su fracturamiento y grado de alteración. Localmente presenta fracturamiento intenso que le confiere permeabilidad alta.

Secuencia Volcánica Bimodal TomB-TR, Tom TR-B, TomB-A, Tom TR.-Se denomina secuencia bimodal a una serie de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición basáltica-andesítica, intercaladas con tobas riolíticas e ignimbritas. Sus afloramientos se localizan en la porción sur, noreste y noroeste del acuífero, presentándose también pequeños afloramientos al sur de la comunidad Mulatos. Se pueden diferenciar dentro de esta secuencia las siguientes formaciones: Toba riolítica (Tom TR), Toba riolítica - Basalto (Tom TR-B), Basalto - Toba riolítica (TomB-TR), Basalto - Andesita (TomB-A). Estas rocas conforman extensas y elevadas sierras, se estima sobrepasan los 1000 m de espesor.

La secuencia se encuentra sobreyaciendo en forma concordante a la unidad oligocénica ácida (ToTR-R), en contacto tectónico normal con el conglomerado de la Formación Báucarit y cubierto por basaltos y andesitas basálticas del Mioceno.

El fracturamiento de esta secuencia es variable, desde fracturamiento alto en grandes bloques, hasta fracturamiento medio, que es el tipo predominante en la zona.

La permeabilidad de las unidades también varía de alta a media, siendo esta última la que predomina en la zona. Las unidades funcionan como zonas de recarga y llegan a formar acuíferos en roca fracturada con potencial medio, con posibilidades de extraer volúmenes entre 10 y 20 lps.

Formación Báucarit TmCgp Ar, TmCgp-B, TmB-A. 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. Se encuentra aflorando principalmente en la porción suroccidental del acuífero, en las inmediaciones del valle de Yécora, y al oeste de Maycoba, así como al norte del acuífero, específicamente al oriente de la comunidad Mulatos. Hidrogeológicamente funciona como barrera natural (confinante) entre las rocas sedimentarias (acuífero en explotación) y rocas fracturadas que posiblemente constituyan un acuífero a profundidad.

Formación Lista Blanca (TmTR, TmTR-A). Definida por Dumble (1900) la Formación Lista Blanca consiste de una secuencia volcánica y conglomerática. Actualmente la edad asignada a esta unidad es del Terciario (Bertollini et al 1991), ya que sobreyacen de manera concordante al conglomerado de la Formación Báucarit. Aflora en la porción central y sureste del acuífero. Consiste principalmente de tobas riolíticas, aglomerados, andesitas, ignimbritas, basaltos y andesitas basálticas.

Estas rocas se presentan fracturadas por lo que se considera constituyen zonas de recarga; localmente pueden llegar a formar un acuífero con posibilidades bajas, con gastos entre 15 y 20 lps. Sus afloramientos se concentran al occidente de la comunidad Maycoba, de igual manera al oriente y sur de la zona (fuera de los límites del acuífero). Conglomerados Recientes Limos, Arenas y Gravas (Qpt Cgp). Los conglomerados recientes están definidos por unidades conglomeráticas polimícticas mal consolidadas con escasos horizontes de limos y arenas, los clastos de los conglomerados están por lo general bien redondeados. Forman terrazas, depósitos de talud y pequeños abanicos aluviales.

En la zona estos conglomerados se encuentran escasamente distribuidos ya que solo se observan en las márgenes de los arroyos, así como en la zona centro occidental del acuífero.

La unidad tiene potencial acuífero que varía de medio a alto, esto se observa en otros acuíferos, donde la mayoría de sus aprovechamientos están perforados sobre esta unidad.

Aluvión Cuaternario (Qhoal). Los sedimentos del Holoceno son producidos por el intemperismo de rocas preexistentes y son depositados como abanicos aluviales a lo largo de ríos, arroyos y planicies de inundación. Los sedimentos están constituidos por gravas de diferentes litologías, arenas y limos. En este material se encuentran localizados los aprovechamientos censados en los alrededores de la comunidad Yécora, donde su permeabilidad es alta.

## **ROCAS INTRUSIVAS**

Batolito Laramide, Intrusivos Porfídicos Secundarios (Kstpa GrGd, KsTeGd-D, ToPMz, ToPR, ToPA, TmPqMz).

El batolito incluye todas las intrusiones calcoalcalinas y granitos presentes en la región. Se diferencian y engloban seis cuerpos intrusivos, los cuales se describen a continuación: KsTpaGr-Gd: Se trata de un intrusivo de composición Granito - Granodiorita, el cual aflora en la porción central del acuífero, cerca de la localidad Maycoba, así como al occidente, fuera del acuífero.

KsTeGd-D: Se refiere a un cuerpo compuesto de Granodiorita – Diorita, localizado en la porción este, fuera del área del acuífero.

ToPMz: Es un intrusivo pórfido-monzonítico, el cual se localiza en la porción central del acuífero, específicamente al sureste de Mulatos.

ToPR: Corresponde a un pórfido riolítico localizado en la porción sur del acuífero, al este de Maycoba.

ToPA: Se trata de un pórfido andesítico localizado en la zona centro-occidental y nor-occidental del acuífero.

TmPqMz: Es un intrusivo pórfido cuarzomonzonítico localizado al sur del poblado Yécora.

Este grupo de unidades opera como basamento hidrogeológico debido a sus condiciones litológicas, alto grado de compactación y bajo grado de fracturamiento.

#### **4.2 Geología estructural**

El comportamiento estructural de la zona es producto de diversos eventos tectónicos como la Orogenia Laramide (Cretácico Tardío - Terciario Temprano), posteriormente sobrevino un evento distensivo del Terciario Medio – 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.

La zona está conformada por una sucesión de sierras altas, alargadas de rumbo preferencial noroeste-sureste, separadas por el valle de Yécora, el cual está relleno de material clástico derivado de las montañas circundantes; esta morfología es producto de la última etapa tectónica distensiva iniciada a partir del Terciario.

Se observan fallas normales con orientación preferente noroeste-sureste, así como fallas laterales con la misma orientación y otras orientadas prácticamente este-oeste. En cuanto a los principales sistemas de fracturas, tienen orientación preferente noreste-suroeste, y en menor ocurrencia noroeste-sureste. En algunos casos las fracturas constituyen los cauces de los principales arroyos, los cuales tienden a ser paralelos entre sí, o en su caso tienden a limitar una serie de estructuras semi-circulares y anulares que evidencian la presencia de cuerpos ígneos intrusivos.

#### **4.3 Geología del subsuelo**

Dentro de los límites del acuífero son escasos los depósitos sedimentarios de espesor considerable, el de mayor importancia se localiza en el Valle de Yécora, donde se ubica la gran mayoría de los aprovechamientos censados en 2008 y del cual se extrae la mayor cantidad de agua en el acuífero. En este valle se observan materiales constituidos por depósitos no consolidados y semiconsolidados de granulometría variada (gravas, arenas, limos y arcillas) con un espesor estimado entre 50 y 100 metros, que constituyen un acuífero somero.



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. El esquema de funcionamiento acuífero se puede observar en la figura 3.

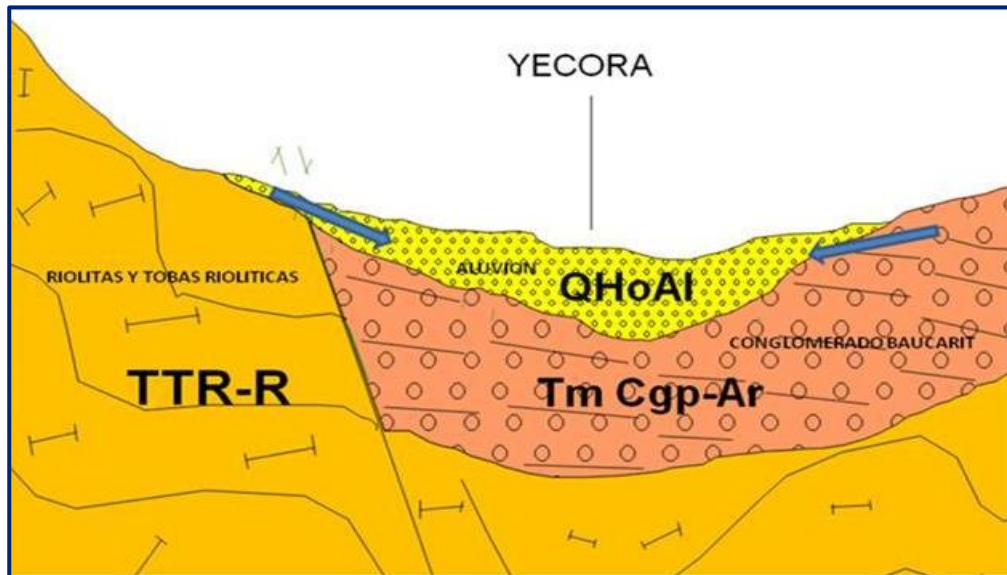


Figura 3. Modelo conceptual de funcionamiento acuífero

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

Se trata de un sistema acuífero granular de tipo libre, donde el agua tiene movimiento a través de material granular y fracturado. El medio granular está constituido por depósitos no consolidados y semiconsolidados de granulometría variada (gravas, arenas, limos y arcillas) que afloran en los alrededores del poblado de Yécora, cuyo espesor varía entre 50 y 100 m.

Subyaciendo a estos materiales se encuentran los depósitos conglomeráticos consolidados de la Formación Báucarit, de amplia distribución en la zona, cuyo espesor alcanza los 200 m. Esta unidad constituye el basamento geohidrológico del acuífero granular formado por el Valle de Yécora. Bajo los depósitos sedimentarios se encuentra una gran variedad de rocas volcánicas, desde andesitas, riolitas, tobas, etc., que presentan localmente presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, cuyo espesor total puede alcanzar más 2500 m.

La principal recarga al acuífero ocurre por la infiltración de la lluvia en las zonas topográficamente altas. Tal es el caso de la Sierra Laguna, ubicada al noroeste, la Sierra Agua Sarca, al norte, la Sierra El Jarro, al sur y la Sierra Trigo Colón, al este.

Estas sierras están constituidas por rocas volcánicas fracturadas, riolitas, tobas riolíticas, basaltos y andesitas, que posiblemente constituyen un acuífero potencial a mayor profundidad, en cuyo caso su basamento regional está formado por una serie de intrusivos, en su mayoría Laramídicos.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades de campo desarrolladas en 2008, se ejecutó una prueba de bombeo de larga duración, tanto en su etapa de abatimiento como de recuperación. La interpretación de los datos de campo se realizó por el método de Neuman. De acuerdo con los resultados de la interpretación, los valores de transmisividad obtenidos en la etapa de abatimiento y recuperación varían de **3.78  $1.40 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** ; en tanto que para la conductividad hidráulica se reportan valores que oscilan entre **1.26  $\times 10^{-5}$  y 2.72  $\times 10^{-5} \text{ m/s}$** .

Los valores arrojados por la prueba de bombeo no son representativos de la zona de valle donde se aloja el acuífero. Con base en las características de los depósitos granulares y el espesor promedio del acuífero, se consideró un valor de transmisividad de **240  $\text{m}^2/\text{día}$  ( $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )**, para estimar las entradas y salidas horizontales.

## **5.3 Piezometría**

Con el propósito de conocer las condiciones piezométricas del acuífero, de manera paralela al censo de aprovechamientos elaborado en 2008, se llevó a cabo una campaña de mediciones piezométricas, en la cual se obtuvieron los niveles estáticos de 6 aprovechamientos. Cabe mencionar que cuatro de los aprovechamientos censados se ubican en el Valle de Yécora, que corresponde a la zona evaluada para el planteamiento del balance y cálculo de disponibilidad media anual, mientras que los dos aprovechamientos restantes fueron censados en la mina ubicada cerca de la comunidad Mulatos.

Para efectos de configuraciones piezométricas únicamente fueron tomados en cuenta los datos tomados en el Valle de Yécora.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

La zona acuífera en explotación se encuentra restringida a la pequeña zona de valle en donde se localiza el poblado Yécora. El agua que se infiltra en las porciones altas de la cuenca, constituidas por rocas volcánicas fracturadas viaja a través de una serie de fracturas y en dirección paralela a los principales escurrimientos superficiales. En el valle también tiene lugar recarga vertical producto de precipitaciones. No existe recarga producto de la infiltración por retorno de riego agrícola, debido a que el único aprovechamiento activo en la zona de valle es de uso público urbano. La agricultura que se desarrolla en la región es de temporal. La descarga artificial del acuífero se lleva a cabo mediante el bombeo del pozo de agua potable en la comunidad Yécora, así como en dos pozos ubicados en la mina de la Comunidad Mulatos. Mientras que la descarga natural en el valle se produce por evapotranspiración en las zonas con niveles freáticos someros con presencia de abundante vegetación.

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en los aprovechamientos varía de 1.4 a 10.0 m; los valores más someros se registran en los alrededores de la comunidad Yécora, los cuales se incrementan gradualmente hacia el sur, conforme se asciende topográficamente (figura 4).

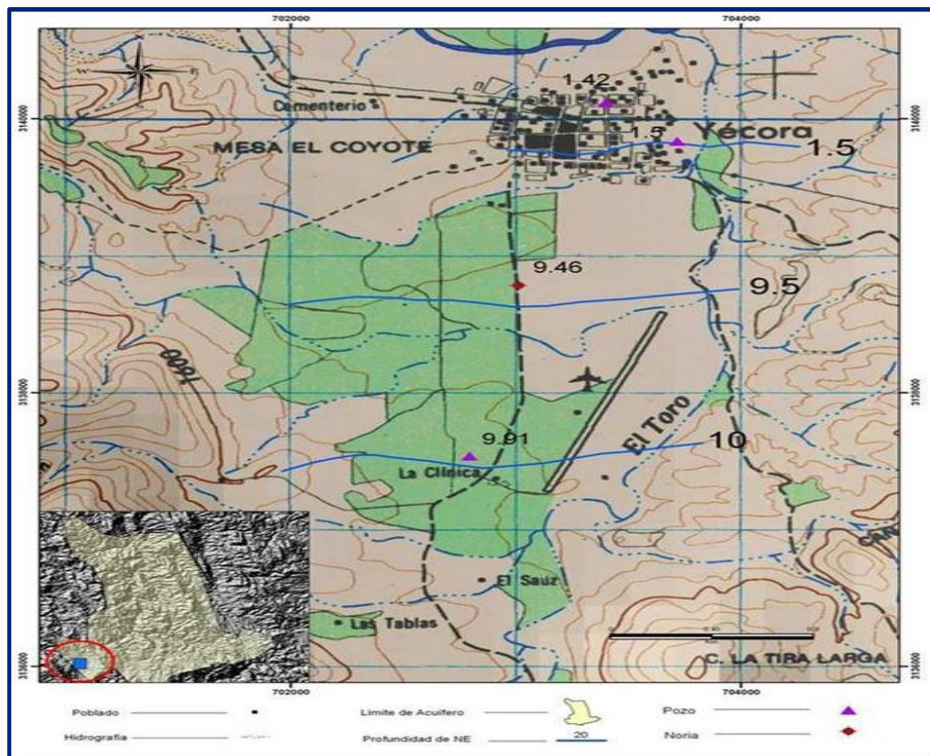


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008).

La configuración se restringe a la única zona de valle identificada, la cual se ubica en el extremo suroccidental del acuífero, donde se localiza el poblado Yécora. En el resto del acuífero predominan grandes sierras y cañones escarpados.

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de la elevación del nivel estático para el año 2008 mostrada en la figura 5, al igual que la profundidad, sólo se refiere al extremo suroeste del acuífero (zona de valle). Se observan elevaciones que varían desde 1522 hasta 1546 msnm, los valores máximos se registran en la porción sur del Valle de Yécora, mientras que elevaciones mínimas se presentan en la zona centro norte del valle, mostrando claramente el reflejo de la topografía y evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo no ha sufrido modificaciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo, manteniendo sus condiciones iniciales.

La dirección preferencial de flujo subterráneo es sur a norte, paralela a los principales escurrimientos superficiales de la zona, así como a un gran número de tributarios. La configuración muestra que el acuífero no recibe aporte del material conglomerático que rodea al valle, por lo cual las equipotenciales llegan de manera perpendicular a los primeros lomeríos que lo rodean.

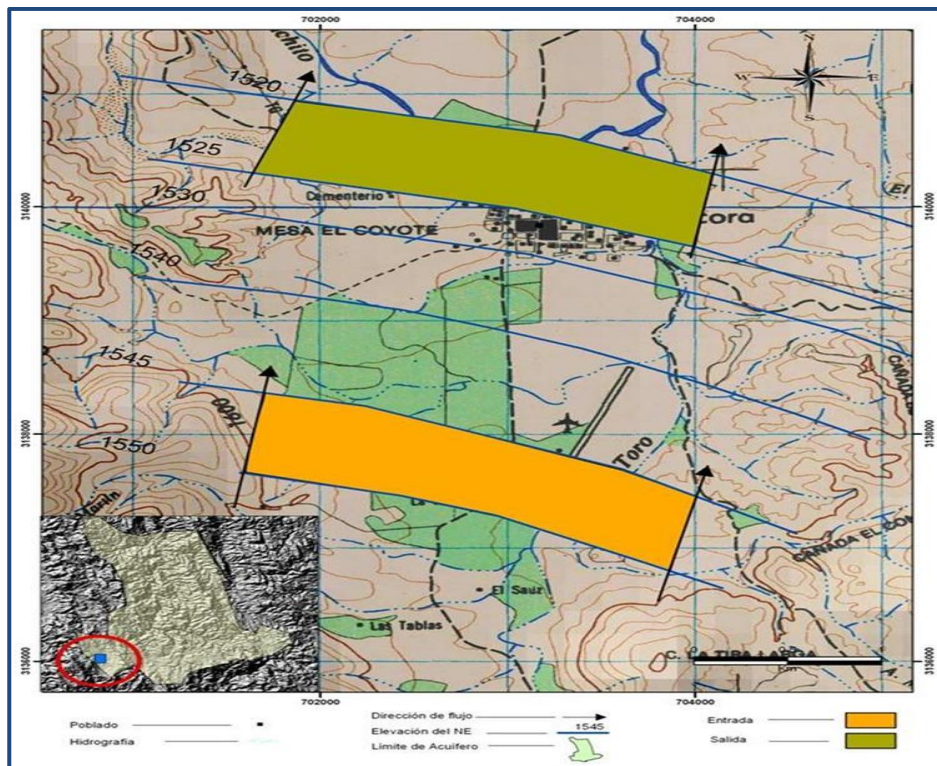


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008) y celdas horizontales de entrada y salida

### **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. Aunado a lo anterior, 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 0.4 hm<sup>3</sup> anuales, valor que es inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

### **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Durante la etapa de censo y piezometría efectuados en el 2008, se midieron en campo diversos parámetros fisicoquímicos como: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, salinidad, oxígeno disuelto, pH y Eh.

Dado que la mayor parte de los parámetros físicos y químicos medidos en 2008 presentan valores de pH cercanos a la neutralidad, así como valores bajos de Sólidos Totales Disueltos (STD), la mayor parte del agua subterránea está asociada a agua de reciente infiltración. No se descarta la presencia de iones mayores y/o metales pesados en concentraciones elevadas, en su caso esto sería en zonas puntuales donde la geología y sus procesos mineralógicos cambien la calidad del agua, la cual estaría asociada a un tiempo mayor de residencia y tránsito en el acuífero.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

En 2008 fueron censados seis aprovechamientos, de los cuales tres corresponden a norias y tres a pozos. Tres aprovechamientos se encuentran en estado inactivo (abandonados) y el resto se mantiene activo: el pozo de agua potable en la comunidad Yécora y los dos pozos ubicados en la unidad minera Mulatos.

En conjunto, el volumen de extracción asciende a **0.4 hm<sup>3</sup> anuales**, los cuales se utilizan para abastecimiento de agua potable a la comunidad de Yécora, además del abastecimiento de agua a la unidad minera localizada en Mulatos.

Cabe mencionar que existe un gran número de pequeñas comunidades o rancherías que se abastecen del agua procedente de los manantiales perennes.

## **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 **120 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona de valle, que es en 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 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**

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas y de la infiltración de las pérdidas de las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, y el riego agrícola es incipiente, no existe recarga inducida.

### 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ) fue considerado como nulo, 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.

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

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Eh:** Entradas por flujo horizontal

**B:** Bombeo

**Sh:** Salidas por flujo horizontal

**ETR:** Evapotranspiración real

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

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

La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 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 ( $\Delta h$ ). 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:

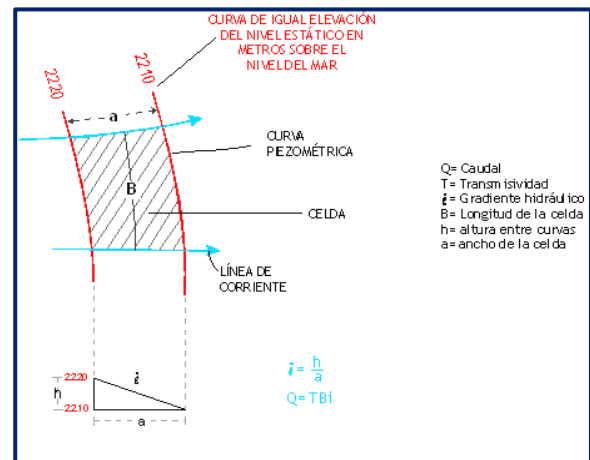
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

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:

$$T = K b$$

El valor de transmisividad utilizado fue estimado con base en la prueba de bombeo efectuada en 2008, a las consideraciones geológicas de la zona donde se ubican la celdas de flujo y al espesor saturado promedio del acuífero, siendo este de 240 m<sup>2</sup>/día (2.8 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s).

Como resultado del análisis de las celdas de flujo se obtuvo un valor de **1.7 hm<sup>3</sup>/año** que representa las entradas horizontales a la zona de influencia del balance de aguas subterráneas realizado en la zona de valle. En la Tabla 2 se muestra en resumen el cálculo del volumen de entrada.

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

| CANAL                 | LONGITUD B<br>(m) | ANCHO a<br>(m) | $h_2-h_1$ | Gradiente i | T                   | CAUDAL Q            | VOLUMEN                |
|-----------------------|-------------------|----------------|-----------|-------------|---------------------|---------------------|------------------------|
|                       |                   |                | (m)       |             | (m <sup>2</sup> /s) | (m <sup>3</sup> /s) | (hm <sup>3</sup> /año) |
| E1                    | 2493              | 638            | 5         | 0.0078      | 0.0028              | 0.0547              | 1.7                    |
| <b>Total entradas</b> |                   |                |           |             |                     |                     | <b>1.7</b>             |

## 7.2 Salidas

Son los volúmenes de agua ya sean naturales o extraídos que salen del acuífero y son representados por la evapotranspiración real (ETR), el bombeo (B) y salidas horizontales (Sh).

### 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 con aquella 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 10 m, bajo el siguiente proceso.

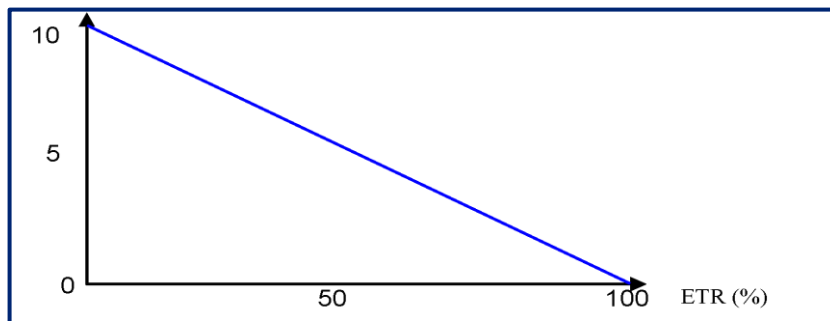
En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

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

Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 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, dando como resultado 559.8 mm anuales, tomando en consideración valores medios anuales de temperatura en 14.11° C y precipitación de 749.5 mm.

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

|          |             |                  |            |
|----------|-------------|------------------|------------|
| T (°C) = | 14.11       |                  |            |
| P(mm) =  | 749.5       | P <sup>2</sup> = | 561750.25  |
| L =      | 793.2094766 | L <sup>2</sup> = | 629181.274 |
| ETR (mm) | 559.8       |                  |            |



Considerando esto se elaboró la tabla 3, en la que se puede observar que el valor de la evapotranspiración asciende a **8.7 hm<sup>3</sup> anuales**

Tabla 3. Cálculo de evapotranspiración

| Intervalo curvas (m) | Profundidad (m) | Area (km <sup>2</sup> ) | %    | ETR (m) | Vol ETR (hm <sup>3</sup> /año) |
|----------------------|-----------------|-------------------------|------|---------|--------------------------------|
| 1 a3                 | 1.5             | 8.14                    | 0.85 | 0.56    | 3.9                            |
| 3 a6                 | 4.5             | 9.34                    | 0.55 | 0.56    | 2.9                            |
| 6 a 9                | 7.5             | 10                      | 0.25 | 0.56    | 1.4                            |
| 9 a 10               | 9.5             | 18                      | 0.05 | 0.56    | 0.8                            |
|                      |                 |                         |      |         | <b>8.7</b>                     |

### 7.2.2 Extracción por bombeo (B)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos realizado en el estudio del 2008, se cuantificó el volumen de extracción de agua subterránea, de manera directa cuando el equipo de extracción cuenta con medidor de flujo, o través de la información recabada en campo durante el censo: tiempo de operación, superficie regada y estimaciones de acuerdo a las características de las obras. Se calculó un volumen total de extracción de **0.4 hm<sup>3</sup> al año**.

### 7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del nivel estático mostrada en la figura 5. El valor estimado es de **1.6 hm<sup>3</sup>/año**, calculado en una sección próxima al extremo norte del área de balance.

Las celdas de flujo utilizadas para estimar la salida horizontal se observan en la Figura 5, mientras que el cálculo del caudal se presenta en la Tabla 4.

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                   | 2379           | 673         | 5         | 0.0074      | 0.0028              | 0.0495                       | 1.6                            |
| <b>Total salidas</b> |                |             |           |             |                     |                              | <b>1.6</b>                     |

### 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.  $\Delta V(S) = 0$ .

### 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:

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

Sustituyendo valores:

$$Rv = 1.6 + 0.4 + 8.7 - 0.0 - 1.7$$
$$Rv = 9.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Tomando en cuenta lo anterior la recarga total es igual a

$$R = Rv + Eh$$
$$R = 9.0 + 1.7$$
$$R = 10.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero  
**R** = Recarga total media anual  
**DNC** = Descarga natural comprometida  
**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### **8.1 Recarga total media anual (R)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **10.7 hm<sup>3</sup>/año**, todos ellos son de recarga natural

### **8.2 Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **0.0 hm<sup>3</sup> anuales**.

### **8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)**

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **10,253,596 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 10.7 - 0.0 - 10.253596 \\ \text{DMA} &= 0.446404 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **446,404 m<sup>3</sup> anuales.**

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos, México, D.F.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Estudio Geohidrológico del Acuífero Río Sahuaripa. Convenio de Colaboración con Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca del Noroeste.