



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL
DE AGUA EN EL ACUÍFERO HIDALGO (3202), ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. GENERALIDADES | 2 |
| Antecedentes | 2 |
| 1.1 Localización del acuífero | 2 |
| 1.2 Situación administrativa del acuífero | 4 |
| 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD | 4 |
| 3. FISIOGRAFÍA | 6 |
| 3.1 Provincia fisiográfica | 6 |
| 3.2 Clima | 7 |
| 3.3 Hidrografía | 8 |
| 3.4 Geomorfología | 9 |
| 4. GEOLOGÍA | 10 |
| 4.1 Estratigrafía | 12 |
| 4.2 Geología estructural | 16 |
| 4.3 Geología del subsuelo | 17 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA | 18 |
| 5.1 Tipo de acuífero | 18 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos | 18 |
| 5.3 Piezometría | 19 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico | 19 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático | 19 |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático | 20 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático | 21 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea | 22 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA | 23 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS | 24 |
| 7.1 Entradas | 24 |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv) | 25 |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) | 25 |
| 7.2 Salidas | 26 |
| 7.2.1 Bombeo (B) | 27 |
| 7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) | 27 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) | 27 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 28 |
| 8.1 Recarga total media anual (R) | 29 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC) | 29 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) | 29 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) | 30 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 31 |

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 del acuífero

El acuífero Hidalgo, definido con la clave 3202 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del estado de Zacatecas, en su límite con el estado de Durango, entre los paralelos 23°37'12" y 24°04'27" de latitud norte y entre los meridianos 103°28'00" y 103°52'19" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,162.33 km².

Limita al norte y este con el acuífero El Palmar; al sureste con Saín Alto, al sur con Sabinas; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas: al oeste, noroeste y suroeste con el acuífero Vicente Guerrero-Poanas, del estado de Durango (figura 1).

Geopolíticamente, casi la totalidad del territorio del acuífero se localiza en el municipio Sombrerete, solo algunas pequeñas porciones de su extremo norte pertenecen al municipio Miguel Auza.

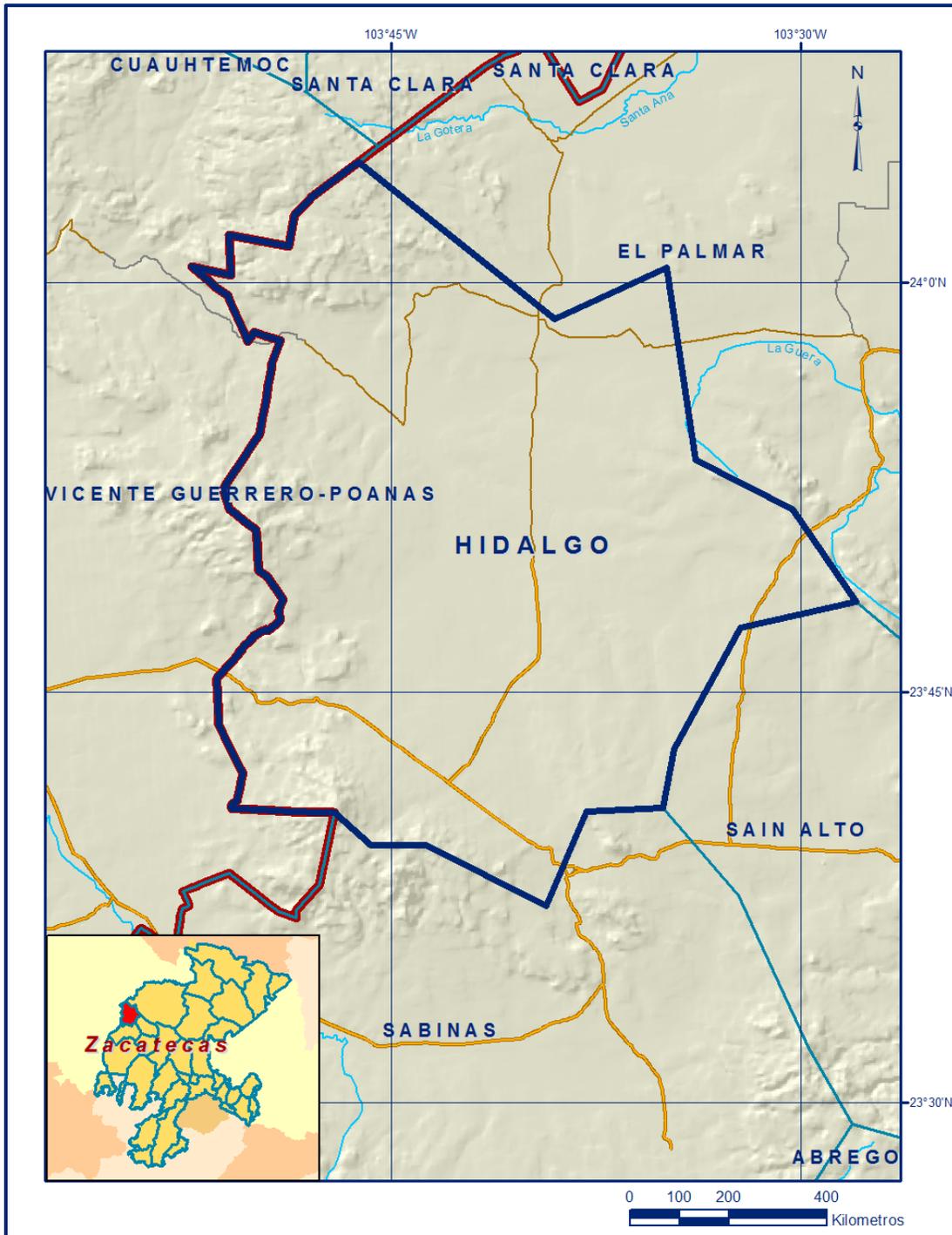


Figura 1. Localización del acuífero

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 que delimitan al acuífero

ACUÍFERO 3202 HIDALGO

| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
|---------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|----------------------------------|
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 103 | 47 | 5.2 | 23 | 40 | 35.7 | DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 2 | 103 | 46 | 11.9 | 24 | 4 | 24.9 | |
| 3 | 103 | 39 | 0.6 | 23 | 58 | 39.8 | |
| 4 | 103 | 34 | 54.4 | 24 | 0 | 32.6 | |
| 5 | 103 | 33 | 51.4 | 23 | 53 | 30.6 | |
| 6 | 103 | 30 | 19.1 | 23 | 51 | 43.1 | |
| 7 | 103 | 27 | 58.7 | 23 | 48 | 19.9 | |
| 8 | 103 | 32 | 14.3 | 23 | 47 | 22.9 | |
| 9 | 103 | 34 | 38.8 | 23 | 42 | 56.5 | |
| 10 | 103 | 35 | 3.3 | 23 | 40 | 47.6 | |
| 11 | 103 | 37 | 51.7 | 23 | 40 | 38.0 | |
| 12 | 103 | 39 | 18.9 | 23 | 37 | 10.9 | |
| 13 | 103 | 43 | 44.2 | 23 | 39 | 25.7 | |
| 14 | 103 | 45 | 45.1 | 23 | 39 | 24.1 | |
| 1 | 103 | 47 | 5.2 | 23 | 40 | 35.7 | |

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Hidalgo pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Norte, al Consejo de Cuenca “Ríos Presidio al San Pedro”, instalado el 15 de junio de 2000, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Zacatecas. Su territorio completo se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios señalados”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de agosto de 1988. Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de exploración y evaluación, algunos de tipo regional; a continuación, se citan los más importantes consultados para la elaboración de este documento:

PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Consultec Ingenieros Asociados, S.C., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1977. El estudio se realizó en el área que cubre los acuíferos Hidalgo, Sabinas, El Palmar y Saín Alto. Entre sus actividades principales destacan el censo de aprovechamientos, piezometría, toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos y el muestreo de roca para análisis petrográfico y paleontológico. Realiza un análisis de la región para identificar las zonas de recarga a los acuíferos e identifica zonas con buenas posibilidades para la explotación del agua subterránea.

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA REGIÓN DE SAÍN ALTO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA) en 1981 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Este estudio comprendió también actividades en el área del acuífero Hidalgo y tuvo como objetivos definir las estructuras y unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua y localizar las áreas más favorables para la perforación de pozos exploratorios. Entre sus actividades de campo destacan el censo de aprovechamientos, ejecución de exploraciones geofísicas, muestreo de agua subterránea, interpretación fotogeológica e hidrológica con verificación de campo y obtención de muestras de roca para análisis micropaleontológicos y radiométricos. Entre sus conclusiones más importantes identifica dos unidades acuíferas: una alojada en los materiales clásticos de los rellenos aluviales del Cuaternario y los conglomerados cenozoicos poco cementados; y otra de permeabilidad secundaria alojada en tobas riolíticas y las lutitas-areniscas de la Formación Caracol. El agua la clasificó como de composición química cálcica-bicarbonatada, apropiada para todos los usos.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS ZONAS DE EL PALMAR Y SAÍN ALTO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Consultores en Agua Subterránea, S.A. en el 2000 para la Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Zacatecas. El estudio comprendió también trabajos en el área del acuífero Hidalgo. Mediante actividades de campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales, hidrometría de la extracción, realización de pruebas de bombeo y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas y determinar la calidad del agua. Concluye que los valores promedio de conductividad hidráulica varían de 0.1 a 1.0 m/día, que la profundidad al nivel del agua subterránea variaba de 10 a 120 m, con abatimiento máximo de 2.5 m anuales en la

zona de concentración de pozos y recuperaciones de 0.2 m anuales. Por su bajo contenido de sales el agua subterránea se consideró apta para consumo humano, aunque en Saín Alto se detectaron concentraciones de flúor ligeramente más altas que el límite máximo permitido que establece la norma mexicana.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS HIDALGO Y SABINAS. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V. en 2006 para la Comisión Nacional del Agua.

El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento del flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, a través de la obtención de información procedente de las redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en estos acuíferos. Mediante actividades de campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales, hidrometría de la extracción, realización de pruebas de bombeo y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico, fue posible plantear el balance de aguas y determinar su disponibilidad. Una conclusión importante es la identificación de pozos que físicamente se encuentran fuera del límite del acuífero Sabinas, en los acuíferos vecinos Hidalgo, Corrales, Saín Alto y El Palmar, cuyo volumen concesionado debe descontarse del volumen concesionado e inscrito en el REPDA, que actualmente está incluido en el acuífero Sabinas.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO HIDALGO, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en dos provincias fisiográficas, la mayor parte de la superficie del acuífero se ubica en la provincia fisiográfica Mesa Central y sólo una pequeña área del extremo occidental pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la

provincia fisiográfica Mesa del Centro, subprovincia Sierras y Llanuras del Norte; y en la provincia Sierra Madre Occidental, subprovincia Sierras y Llanuras de Durango.

La Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la región central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2,000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m. La subprovincia, Sierras y Llanuras del Norte se caracterizan por presentar extensas llanuras altas, de 2,000 a 2,200 msnm, limitadas por sierras alargadas y angostas, que en general están orientadas en dirección NW-SE, así como zonas de lomeríos.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1500 y 1800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias. Por su parte, la subprovincia Sierras y Llanuras de Durango es una franja angosta y alargada que forma parte de los costados orientales de la Sierra Madre Occidental, desde Cuauhtémoc en Chihuahua hasta Sombrerete en Zacatecas. Está representada por llanuras amplias y una manifestación importante de mesetas, constituidas principalmente por riolitas e ignimbritas. Se caracteriza por la presencia de sierras de mediana altura constituidas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como sedimentos marinos y continentales, orientadas preferentemente en dirección NW-SE. Las altitudes promedio varían de 2,100 a 2,200 msnm con altitudes máximas que alcanzan 3,000 msnm. Las mayores elevaciones de la región son la Sierra Guadalupe de Las Corrientes, ubicada al este; La Sierra Yerbabuena al norte, al suroeste la Sierra El Cordón El Pajarito y al oeste la Sierra Santa María; cuyas elevaciones varían de 2,100 a 2,500 msnm.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la superficie del acuífero prevalece el clima semiseco templado BS₁kw. Es clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco, con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando las

temperaturas medias anual del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido. El régimen de lluvia (w), define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

En la porción sur y suroccidental del acuífero, en la la Sierra de Sombrerete que es la zona topográficamente más alta, se presenta un clima de tipo templado subhúmedo C(w₀), con lluvias en verano, mesotérmico es decir, intermedio en cuanto a temperatura.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 6 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Arenal, Colonia González Ortega, Puertos de San Francisco, Felipe Ángeles, Narciso Mendoza, y Súchil. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1951-2010 y el más corto 1973-2017, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de **476.1 mm, 16.0 °C y 1979.4 mm**, respectivamente.

La precipitación media anual varía de 500 a 700 mm; la temporada de lluvias se presenta de junio a octubre. Las menores precipitaciones ocurren durante los meses de febrero, marzo y abril. El mes más caluroso es mayo y el más frío es enero. La región presenta condición de canícula y heladas en un rango de 20 a 60 días por año.

3.3 Hidrografía

La zona pertenece a la Región Hidrológica No. 11 “Río Presidio-San Pedro”, Subregión Hidrológica “San Pedro, Rosa Morada y Acaponeta”, cuencas Río San Pedro y Río Agua Naval, subcuencas Río Poanas, Río Súchil y Río de Santiago. No existen corrientes superficiales de importancia; sin embargo, la porción sur del acuífero es drenada por un arroyo intermitente, a la altura de la comunidad El Rosario, el cual pasa por la zona de Proaño siguiendo su curso hacia las comunidades de Agua Zarca y Luis Moya. A esta corriente drenan los arroyos que descienden de las zonas montañosas de la Sierra de Sombrerete y Órganos, así como los arroyos que escurren de las zonas semi-altas

de las comunidades de José María Morelos, San Juan del Terrero, Santiago de la Herradura y Charco Blanco, los cuales presentan una dirección preferencial de oriente a poniente.

La infraestructura para el aprovechamiento del agua superficial está representada por las presas Miguel Auza, ubicada en la porción norte, que aprovecha las aguas del arroyo Sanguijuela, cuya capacidad de almacenamiento es de 3.5 hm³; Charco Blanco, localizada en la porción central, en la comunidad del mismo nombre, que aprovecha las aguas del arroyo Las Varas y tiene una capacidad de almacenamiento de 1.0 hm³. Otra presa de menor capacidad es la Presa Grande, que se ubica en la porción sur del acuífero, en las cercanías de Sombrerete, aprovecha las aguas del arroyo Las Huertas y su capacidad de almacenamiento es de 0.15 hm³.

3.4 Geomorfología

Las geoformas que constituyen el paisaje del área son el producto de la composición litológica de las rocas existentes y de los procesos endógenos y exógenos que han ocurrido a través del tiempo geológico. En la superficie del acuífero se distinguen los siguientes tipos de geoformas: sierras, mesetas, bajadas aluviales, valles y lomeríos. Las zonas de sierras formadas por rocas sedimentarias corresponden a lutitas, areniscas y calizas de edad cretácica. A este tipo de geoformas pertenece la sierra Sombrerete, ubicada al sur, de forma alargada y plegada en dirección NW-SE, cuyo levantamiento se originó por el empuje de intrusivos graníticos, en ella se alcanza la máxima elevación de la zona que es de 3,100 msnm; la sierra Cordón El Pajarito, ubicada al oriente de la zona, en el límite con el acuífero El Palmar, alcanza elevaciones del orden de 2,650 msnm; y las sierras Santa Lucía y Santa María ubicadas al oriente y noroeste, respectivamente.

El acuífero está delimitado en su porción norte por bajadas con lomeríos. El elemento más representativo es un valle con lomeríos ubicado en la porción central de la región, en la zona conocida como Proaño, de dimensiones regulares. Las lutitas y areniscas desarrollan un drenaje de tipo dendrítico con enrejado denso, controlado por la disposición que guardan los estratos y las fracturas. Esta característica del drenaje indica la baja permeabilidad de estas rocas sedimentarias y su baja posibilidad de representar acuíferos. Por otra parte, las erupciones volcánicas explosivas y derrames lávicos de tipo ácido, dieron origen a las mesetas que se ubican al occidente del área, las cuales presentan un basculamiento hacia el suroeste y están disectadas por la acción erosiva de los arroyos. Los esfuerzos distensivos en el área generaron cuencas tectónicas que han sido rellenadas con depósitos de sedimentos clásticos.

Considerando el grado de integración del drenaje y la extensión de sus valles, se puede concluir que la zona se encuentra en la etapa de madurez temprana, de acuerdo al ciclo geomorfológico de Davis.

4. GEOLOGÍA

La región se ubica en la provincia geológica del Altiplano Mexicano, en su límite occidental con la provincia Sierra Madre Occidental; desde el punto de vista de los Terrenos Tectono-estratigráficos, se ubica en el Terrero Guerrero, dentro del subterreno Parral (Campa y Coney, 1987). Este subterreno presenta una cubierta mesozoica que es interpretada como la facies de transición entre una margen activa al occidente y un mar marginal al oriente, donde se desarrolló con mayor intensidad la facies de plataforma y se depositaron sedimentos tipo flysch, representados por rocas sedimentarias que consisten en una secuencia areno-pelítica de edad Neocomiano, que varían hacia la cima a lutitas, limolitas, calizas-lutitas, calizas arcillosas y calcarenitas, dispuestas en estratos plegados, presencia de vetas de calcita y espesor de 685 m. Le sobreyacen por contacto tectónico, depósitos de calizas y lutitas del Aptiano que presentan estratificación delgada y un espesor promedio de 60 m. De acuerdo con la litología y fauna, la secuencia turbidítica fue depositada en un ambiente marino de cuenca, con aporte de material volcánico y carbonatados, fuera de las secuencias de la Cuenca Mesozoica; se correlaciona con las secuencias de la Formación Mezcalera.

Cubriendo por discordancia a la secuencia areno-pelítica, aflora un conglomerado polimíctico, constituido por clastos redondeados y subredondeados de areniscas, lutitas y calizas, mal clasificados y cementados por material areno-tobáceo con carbonato de calcio. Su estratificación es paralela y cruzada, con espesor estimado de 50 m. Se le asigna edad del Eoceno. Cubriendo a estas rocas se encuentra en contacto discordante la serie volcánica intermedia del Cenozoico, representada por una alternancia de andesitas-traquitas, con un espesor aproximado de 70 m a la que se le asignó edad del Eoceno-Oligoceno. Sobreyaciendo discordantemente a estas rocas, se deposita una unidad de tobas riolíticas con niveles de brecha compuesta de fragmentos de la misma composición, con clastos angulosos a subangulosos cementados en una matriz silicificada. Se estima un espesor de 50 m. Paralelamente, se depositaron tobas riolíticas intercaladas con flujos piroclásticos, cementados por ceniza, cuyo espesor aproximado es de 350 m.

Del Oligoceno-Mioceno se presentan rocas volcánicas félsicas y máficas, así como plutónicas y subvolcánicas de composición ácida a intermedia. Hacia la base de esta

secuencia existe una alternancia de tobas y lavas de composición riolítica, con brechas volcánicas cuyos clastos son predominantemente de composición riolítica, en la que además se presentan bombas volcánicas y coladas de basalto de color negro que intemperiza a café oscuro. Sobreyaciendo al paquete anterior existe una secuencia de ignimbritas de color rosa, que alterna con tobas de composición riolítica y coladas de basalto de color negro. El paquete anterior subyace a una riolita de textura fluidal, a la que le sobreyace una alternancia de toba arenosa de composición riolítica y tobas lacustres de color blanco con tintes verdes.

La unidad ígnea más joven está constituida por basaltos de estructura compacta y textura afanítica amigdaloides, que tiene un espesor aproximado de 20 m, a los cuales se les asignó edad del Mioceno. En las partes topográficamente más bajas se depositó un conglomerado polimíctico con areniscas, constituido por fragmentos de rocas volcánicas de composición riolítica principalmente y cuarzo, soportados en una matriz areno-tobácea, cuyo espesor es menor de 30 m, de edad Mioceno. En los cauces de los arroyos y en los valles se presentan depósitos aluviales constituidos por gravas y arenas de edad Reciente (Cartas Geológico-Mineras Chalchihuites (F13-B34) y Sombrerete (F13-B25), escala 1: 50000 del SGM, 1999 y 2001, respectivamente (figura 2).

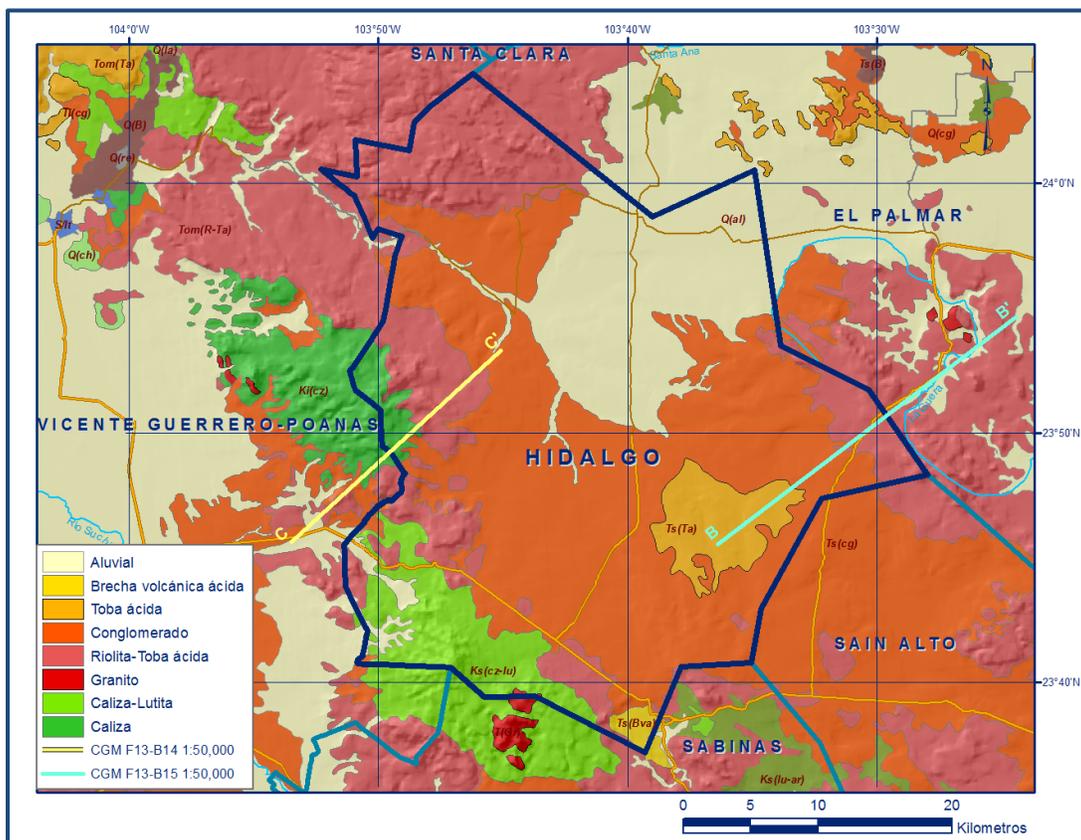


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias marinas y continentales, ígneas intrusivas y rocas volcánicas, así como depósitos aluviales, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

CRETÁCICO INFERIOR

Está representado por una secuencia flysch calcáreo-arenoso, constituida por una alternancia de calizas, lutitas, areniscas, lutitas calcáreas y horizontes tobáceos que en su base contiene areniscas de color amarillento verdoso con manchas ocres, de estructura compacta y textura clástica. Alternan con calizas de color gris claro con laminaciones, de estructura compacta, con bandas de pedernal de color negro de 5 a 25 cm de espesor, intercaladas con lutitas. Su contacto superior discordante es con los conglomerados polimícticos del Mioceno y rocas volcánicas del Cenozoico; de la misma manera con los intrusivos.

Formación Cuesta del Cura.

Está constituida por una secuencia rítmica de lutitas y areniscas depositadas en facies de aguas poco profundas, que aflora al nor-orientado y sur-orientado de la cabecera municipal de Sombrerete. La principal característica que distingue a esta formación es una estratificación ondulada, con abundantes lentes y nódulos de pedernal y marcas de oleaje. Su contenido fósil es escaso y se restringe a algunos amonitas.

Su edad determinada con base en su posición estratigráfica corresponde al Albiano-Cenomaniano, su depósito fue rápido en aguas someras en condiciones poco propicias para la vida marina. Por su posición estratigráfica que subyace a los sedimentos permeables de relleno, así como a las rocas volcánicas fracturadas, y por su muy baja permeabilidad, se considera el basamento geohidrológico de la región. Se correlaciona con la Formación Mezcalera del Norte de México (Chihuahua), con la Formación Proaño en Fresnillo, Zac. y con la Formación Kiamichi y el Grupo Washita del Golfo de Sabinas.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Consiste principalmente de dos series diferentes: en la parte inferior de caliza arcillosa dispuesta en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea que es de color amarillento. La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente

erosionable, que en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa. El espesor total promedio de la formación es de 200 m. Sobreyace a la Formación Cuesta del Cura y es cubierta por la Formación Caracol, generalmente aparece aflorando en las laderas de las sierras. Se correlaciona con la Formación Soyatal de la Cuenca Mesozoica del centro de México, con la Formación Mezcala del Sur de México y con La Formación Agua Nueva de la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Formación Caracol

Secuencia de capas de estratificación mediana a delgada de calizas y lutitas color gris oscuro con bandas de pedernal gris a negro, que intemperizan a color amarillo ocre y rojizo. Su constitución litológica es muy variable debido a que posiblemente su depósito comprendió varias facies diferentes. Se caracteriza por la presencia de calizas con lutitas; las calizas corresponden a micritas arcillosas y recristalizadas de color gris claro, que en roca fresca presenta un color negro de textura wackestone y vetas de calcita. Su estratificación ondulante indica deposición en aguas de profundidad moderada que se encontraban sujetas a cierta agitación en un ambiente infranerítico. Su ambiente de depósito es de plataforma, relativamente profunda con desarrollo de facies arrecifales. Se correlaciona con la formación San Felipe del Noreste de México y con la Formación Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Es la principal unidad litológica que constituye la sierra de Sombrerete, por su posición estratigráfica y contenido fósil, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Su contacto superior es con los conglomerados polimícticos del Mioceno y las rocas volcánicas del Cenozoico. Está afectada por los intrusivos.

CENOZOICO (NEÓGENO)

Pórfido Traquítico

Está conformado por rocas de composición félsica que representan la actividad volcánica más antigua, corresponden a traquitas y latitas de color gris y tonalidades rojas, con estructura compacta y textura porfídica. Aflora muy cerca de la mina “La Colorada” y se extiende hasta la porción sureste de la cabecera municipal de Chalchihuites, en contacto con las calizas y lutitas, afectando discordantemente a calizas-lutitas del Cretácico Inferior y también a las ignimbritas del Oligoceno. Por su posición estratigráfica que guarda con las demás unidades litológicas que atraviesa, se le asignó una edad correspondiente al Oligoceno, correlacionable con el Grupo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental. Son el producto de reactivación de la cámara magmática en el Oligoceno, relacionada a cuerpos granodioríticos-cuarzomonzoníticos.

Riolita

Roca volcánica de color rosa a pardo que intemperiza rosa amarillento, representada por derrames riolíticos de estructura fluidal y compacta, de textura porfídica; se presenta en pequeños afloramientos en forma de lomeríos suaves controlados por fallas en la porción sur, en las inmediaciones de la comunidad El Agua de La Vieja, descansando concordante; mientras que su contacto superior es discordante con el conglomerado polimíctico del Oligoceno Mioceno.

Riolita-Ignimbrita

Unidad constituida por una alternancia de tobas ácidas, ignimbritas y riolitas, que se caracterizan por presentar fracturamiento intenso en la parte superior de sus pseudoestratos, debido a que su enfriamiento fue más rápido. Están constituidas por cuarzo, feldespatos potásico y plagioclasas sódicas en una matriz vítrea de composición ácida; como minerales secundarios presenta sílice, arcillas y clorita. Presenta una estructura fluidal, ligeramente vesicular con pseudoestratos. Está afectada por fallas que provocaron un basculamiento con dirección norte-sur. Su espesor es de 150 m aproximadamente, cuando presenta fracturamiento en superficie funciona como zonas de recarga. Estratigráficamente subyace a basaltos del Cenozoico y su edad corresponde al Oligoceno-Mioceno. Se correlaciona con las unidades volcánicas de la Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental, relacionadas con los eventos tectónicos durante la culminación de la Orogenia Laramide.

Toba ácida-riolítica

Roca volcánica de composición ácida producto de intensa actividad volcánica explosiva, megascópicamente son de color rosa a rosa pardo que intemperiza a un color violáceo, en algunas localidades brechoide y arenosa. Subyace a basaltos y conglomerados, su edad corresponde al Cenozoico. Por su posición estratigráfica se le asignó una edad del Oligoceno y se correlaciona con las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

Supergupo Volcánico Superior

Esta unidad fue originalmente definida por McDowell y Keizer (1977) para caracterizar a las ignimbritas silíceas que fueron emplazadas en dos pulsos principales, uno del Oligoceno Temprano y otro del Mioceno Temprano (Ferrari et al., 2005). Esta actividad volcánica generó en la región centenas de metros de espesor de tobas riolíticas, ignimbritas, riolitas y domos riolíticos, además del desarrollo de calderas de dimensiones kilométricas que están asociadas directamente a la producción de depósitos minerales (Staudé y Barton, 2001). Dentro del área estudiada, esta unidad

incluye una serie de rocas volcánicas y piroclásticas de probablemente edad Oligoceno que afloran ampliamente en la superficie del acuífero.

Rocas Intrusivas

Están representados por granitos y granodioritas de textura porfídica que intrusionan en forma de diques y troncos a rocas del Cretácico Inferior (calizas, areniscas y lutitas), generando metamorfismo de contacto y produciendo recristalización y silicificación de las rocas adyacentes, con la consecuente mineralización. Presenta algunas variaciones a monzonita y su coloración varía de amarillo claro a café.

En el área del acuífero se presentan afloramientos de estos intrusivos en la Sierras de Sombrerete.

Conglomerado Polimíctico

Roca sedimentaria clástica continental compuesta por fragmentos subredondeados a redondeados de tobas riolíticas, riolitas, ignimbritas, vitrófidos, basaltos, calizas recristalizadas, pedernal, lutitas y cuarzo, incluidos en una matriz limo-arcillosa y cementados por sílice. Los clásticos se presentan semiconsolidados, mal clasificados y con ligera oxidación; varían en tamaño desde arenas, gravas hasta guijarros, de 5 mm hasta 64 cm. El depósito muestra gradación normal de los sedimentos, de la base a la cima, de tamaño grueso a los más finos. Aflora ampliamente en las laderas de los valles del Río San Antonio y del arroyo Chalchihuites. Por su posición estratigráfica, se le asina una edad correspondiente al Oligoceno-Mioceno.

Es esta misma litología se incluye a los depósitos de fragmentos subangulosos a subredondeados de calizas, basaltos, riolitas, tobas riolíticas, Ignimbritas, vidrio y areniscas, que varían en tamaño desde arenas hasta gravas, en una matriz limo-arcillosa y en ocasiones arenosa; mal consolidados y clasificados y ligeramente cementados por carbonato de calcio; dispuestos caóticamente. Su espesor en el poblado de San José de Félix es de 200 m, superficialmente presenta una costra de caliche. Aflora ampliamente en forma de terrazas aluviales, de relleno sedimentario de una cuenca en distensión. Por su posición estratigráfica, esta secuencia detrítica se considera de edad Mioceno-Plioceno.

CUATERNARIO

Basalto

Es la roca volcánica más joven generada a partir de fisuras profundas, dispuesta en forma de coladas y filones. Su estructura es compacta, de textura afanítica, con frecuencia vesicular y en ocasiones formando bloques. Cubre a las riolitas y tobas

ácidas del Oligoceno-Mioceno y es correlacionable con los eventos volcánicos de carácter básico ocurridos a finales del Cenozoico Superior o principios del Cuaternario, relacionados con la apertura del Golfo de California.

Aluvión

Unidad detrítica no consolida constituida por depósitos recientes formados por sedimentos que son el producto de erosión de las rocas existentes en el área. Su granulometría es muy variada y está conformada por gravas, arenas, limos y arcillas. Constituye el cauce de los ríos y arroyos.

4.2 Geología estructural

El marco geológico-estructural del área es producto de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, representados por varios eventos distensivos que se manifestaron en el Cenozoico. Como consecuencia del movimiento tectónico que afectó a las rocas mesozoicas y cenozoicas, se generaron anticlinales y sinclinales orientados al NW-SE y N-S, afectados por fallas laterales y normales, fracturas y cabalgaduras con dirección al noreste; las varias fases de intrusión fueron controladas al N y S por dos zonas de fallas de orientación W-NW.

En la imagen de satélite se observan estructuras que corresponden a fallas regionales como la que aparece desde Vicente Guerrero a Orión, con orientación NW-SE, que se manifiesta como un lineamiento que forma parte de una serie de escalonamientos basculados con orientación NW-SE. Las fallas presentes son de tipo normal y las fracturas con orientación predominantemente NW-SE y N-S; las primeras forman las fosas tectónicas y son responsables del basculamiento de algunas mesetas volcánicas.

Durante el periodo Eoceno-Oligoceno se manifiesta el retroceso del arco hacia el oeste, asociándose a este proceso la formación de un vulcanismo de naturaleza ignimbrítica, también se presenta un evento distensivo reactivando algunas fallas antiguas con fases tardías post-Laramide, causando zonas de cizallamiento frágil en sistemas transtensivos, que sirvieron para la inyección de cuerpos multifase como es el caso del intrusivo granodiorítico de la Sierra Prieta, así como la extrusión de rocas volcánicas félsicas en forma de domos y máficas en derrames fisurales. En el Mioceno la distensión provocó fallas normales asociadas a basaltos alcalinos fisurales. Para el Pleistoceno los procesos de erosión y denudación de las rocas preexistentes formaron una cubierta sedimentaria.

En la porción nororiental existen dos direcciones de fallas, la primera tiene una orientación NW-SE con echados al SW, que se observan en la Sierra de Miguel Chiquito, Cordón del Artesano, Cerro Sombrerete y Sierra de Chapultepec; la otra dirección de fallas tiene orientación NE-SW con echados al SE y se presenta en las sierras de Miguel Chiquito y Cordón de las Águilas, que provocaron un escalonamiento. Con base en lo interpretado en la carta magnética existen dos áreas de respuesta magnética alta: la primera corresponde al Graben de Chalchihuites con una orientación NW-SE y la segunda en la comunidad de Estancia de Guadalupe, con una orientación E-W, ambas interpretadas como intrusivos a profundidad (Cartas Geológico-Mineras Chalchihuites (F13-B34) y Sombrerete (F13-B25), escala 1: 50,000 del SGM, 1999 y 2001, respectivamente).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geofísica obtenida en estudios previos, los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y la correlación con acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, podemos afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares y los conglomerados que rellenan el valle. Esta es la principal unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la zona. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, así como rocas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El predominio de sedimentos granulares areno-arcillosos y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, le confieren baja permeabilidad al acuífero; los bajos caudales que aporta sólo son suficientes para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento a profundidad, así como por la secuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. La interpretación de los sondeos gravimétricos y de resistividad, permiten identificar la existencia de grabens extensionales a profundidades que varían de 400 a 600 m, delimitadas por altos estructurales (horts) en las rocas sedimentarias y volcánicas que constituyen su basamento, que están rellenas de depósitos areno-arcillosos, gravas y conglomerados. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen algunos cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas originadas durante la Orogenia Laramide (figura 3).

fin del balance de aguas subterráneas se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.001**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2006-2017, que es el que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2017 presentó valores que variaron de 10 a 80 m; los valores más someros, de 10 a 30 m, se registraron en la porción suroccidental del acuífero, entre los poblados Villa Insurgentes, San Francisco de Órganos, Providencia y San Martín, con variaciones importantes en distancias pequeñas, como resultado de la presencia de condiciones locales de semiconfinamiento y variaciones significativas de los valores de la conductividad hidráulica vertical, existiendo incluso localmente niveles brotantes. Los niveles más profundos, de 75 a 80 m, se presentaron en la región sur, hacia la sierra de Sombrerete, y hacia la porción oriental, entre los poblados Santiago de la Herradura e Ignacio Allende. Hacia la población Francisco Murguía se midieron valores muy locales superiores a 100 m de profundidad (figura 4). En la porción central del valle no existen aprovechamientos en operación debido a que la profundidad al nivel estático es del orden de 130 m, como se registra en un pozo exploratorio en el poblado Charco Blanco.

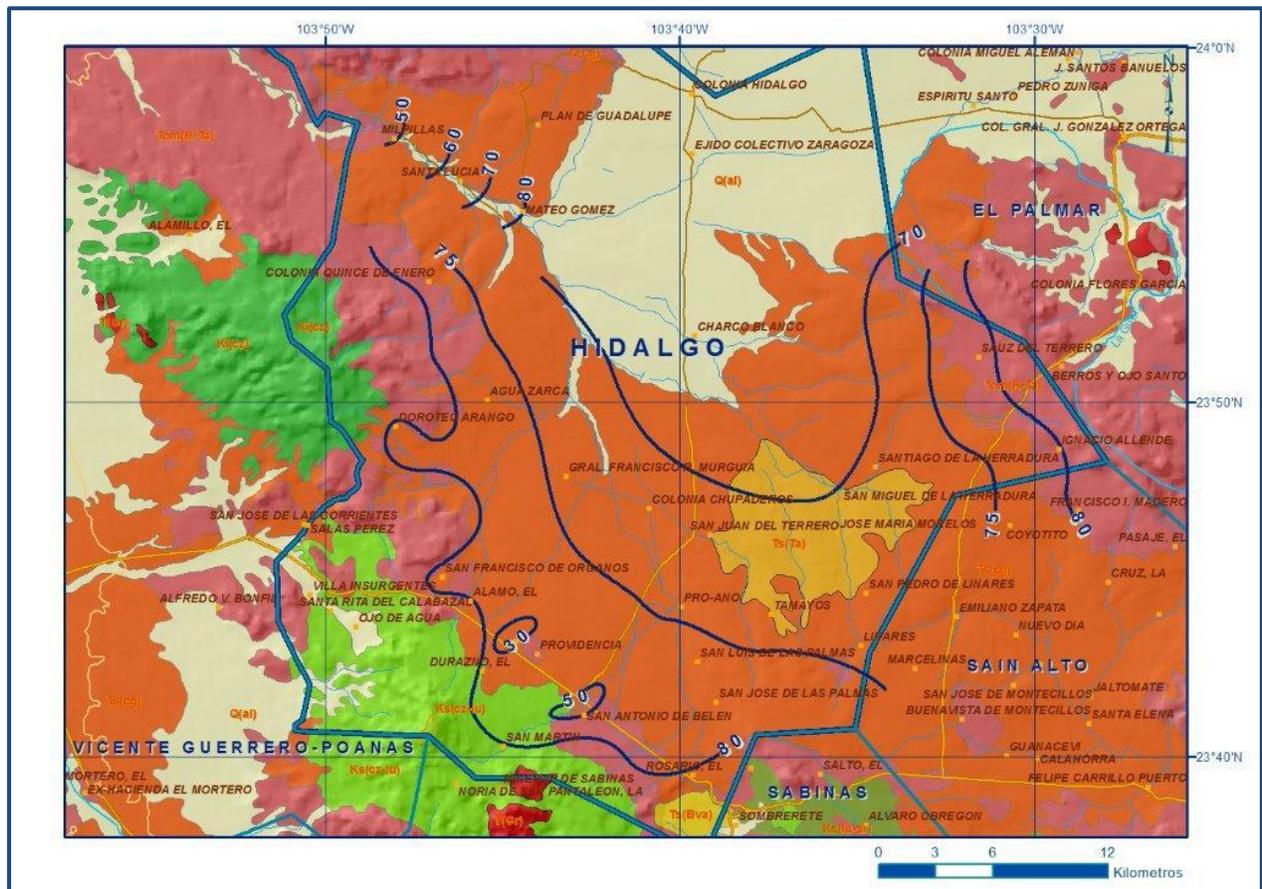


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2017)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2017 registró valores de carga hidráulica que varían de 2,400 a 2,050 msnm, que se incrementan de la porción occidental del acuífero hacia el oriente-suroeste y hacia los flancos de las sierras que lo delimitan. Las menores elevaciones, de 2,050 a 2,060 msnm, se registraron en la porción noroccidental, a lo largo del río Poanas, entre los poblados Milpillas y Mateo Gómez; en tanto que las mayores, de 2,300 a 2,400 msnm, se presentan en los extremos sur, suroccidental y sureste, que rodean al valle central, hacia los poblados Ojo de Agua, San Martín e Ignacio Allende, desde donde descienden gradualmente hacia el norte y noroccidente, en dirección al valle y continuar hacia el río Poanas, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterránea sureste-noroeste y sur-norte, paralela a la red de escurrimiento superficial (figura 5).

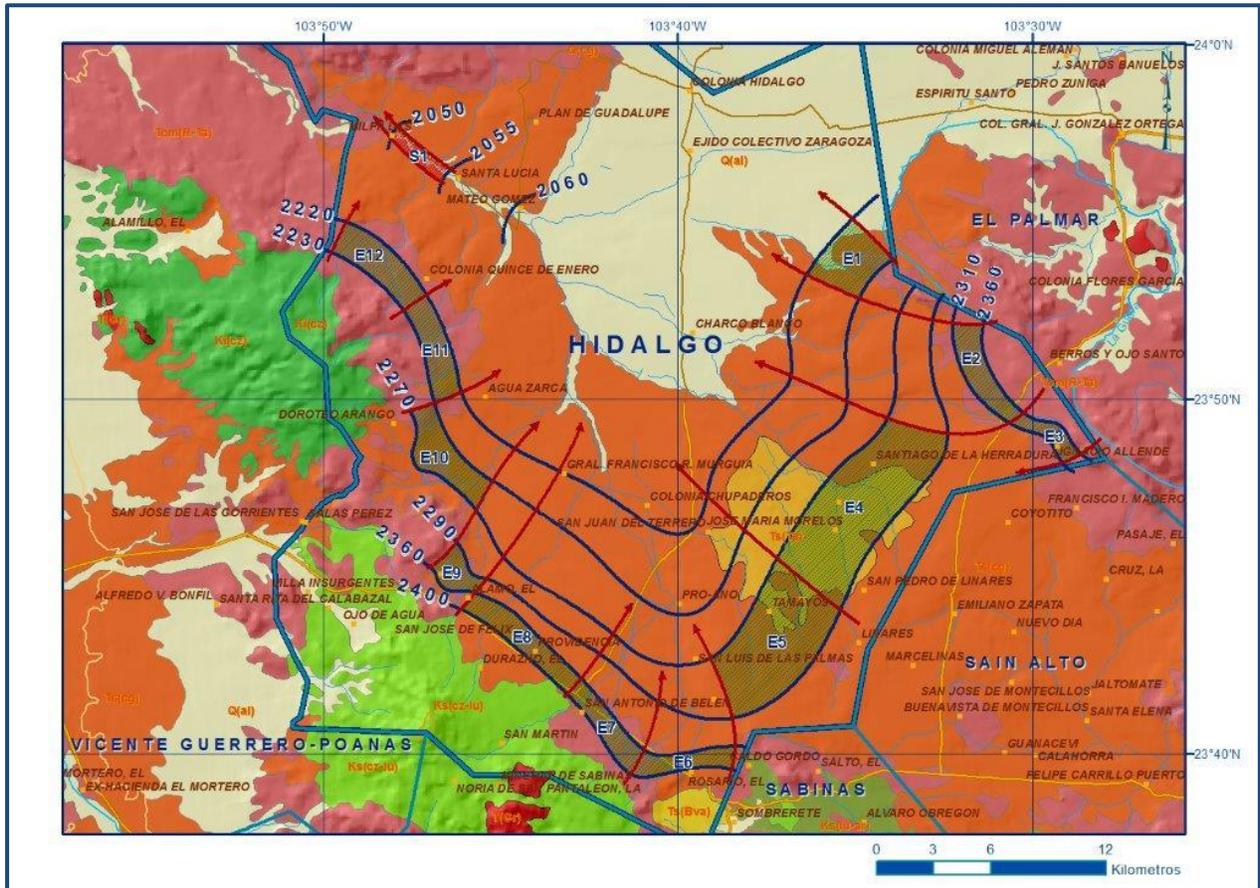


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2017)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para el periodo 2006-2017 la configuración de evolución del nivel estático sólo registró abatimientos en la porción sur y suroriental, que variaron de 1 a 5 m, es decir de 0.1 a 0.4 m anuales, con valores puntuales de 10 m (0.9 m anuales), entre los poblados Colonia Chupaderos, San Juan del Terrero, San Martín y San Francisco de Órganos. En la mayor parte de la superficie de explotación, los niveles del agua subterránea no presentaron variaciones importantes en su posición (figura 6).

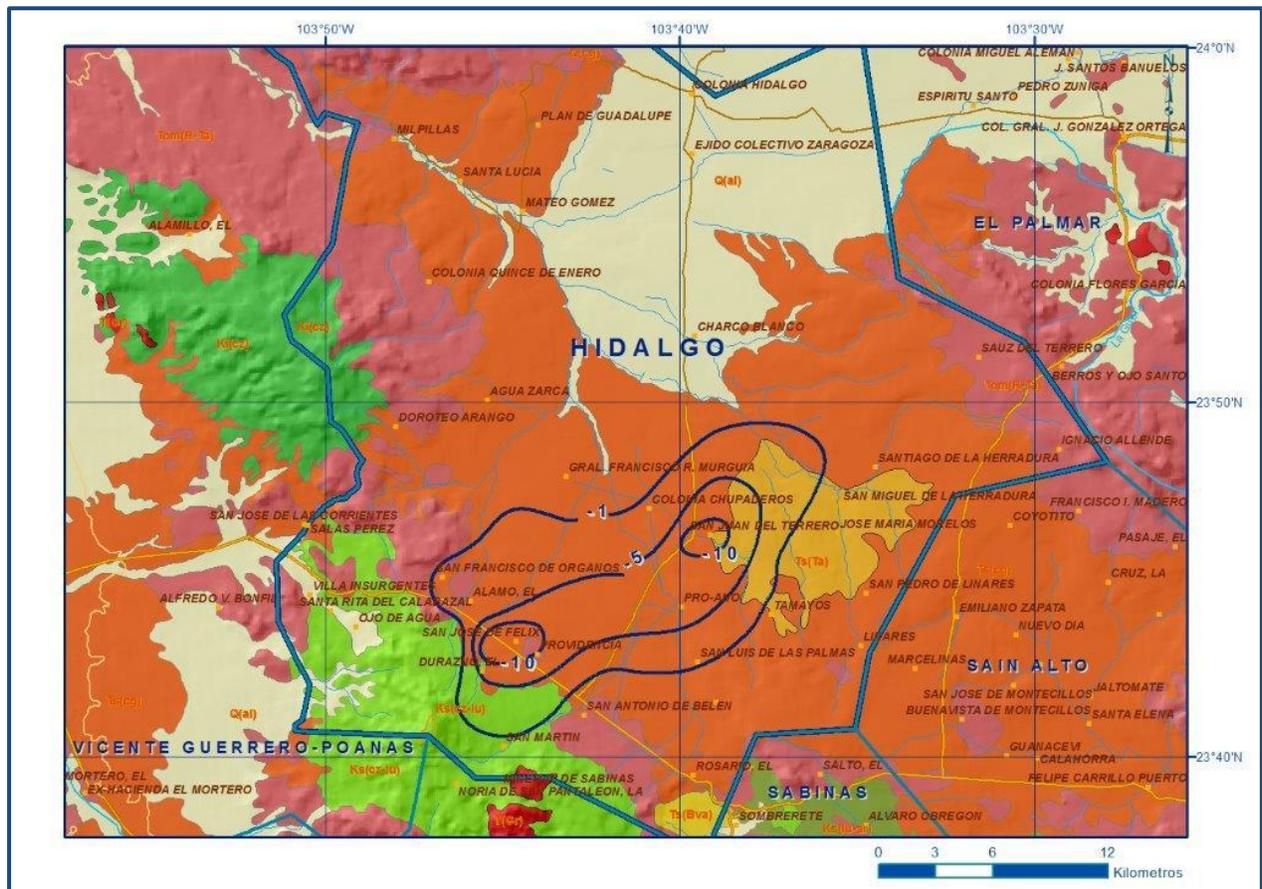


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2006-2017)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2006, se tomaron 15 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, flúor, alcalinidad, así como iones principales y la concentración de 9 metales: Níquel, Mercurio, Manganeseo, Fierro, Cromo, Cadmio, Arsénico, Zinc y Plomo.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD variaron de 110 a 371 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, para el agua destinada al consumo humano. De acuerdo con la clasificación establecida por la

American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presentan valores extremos de 262 a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de SDT y conductividad eléctrica se registran al sur del acuífero y disminuyen hacia el oriente y norte del acuífero. Las temperaturas registradas varían de 18.8 a 38.9 °C en tanto que el pH medido fluctúa entre 6.0 a 7.4. Los parámetros que se encuentran fuera de norma, son los nitratos en 3 muestras y fluoruro en 5 muestras.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia de agua más abundante es la bicarbonatada cálcico-magnésica, que se presentó en 14 aprovechamientos analizados y representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de las rocas calizas que constituyen las zonas de recarga ubicadas en las sierras que delimitan el acuífero.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras de agua se clasifican como C2-S1, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2006 y complementada con información 2017 del Registro Público de Derechos del Agua (REPD), se tienen registradas un total de 120 obras que aprovechan el agua subterránea, 98 son pozos, 20 norias y 2 manantiales, todas ellas están activas; 26 se destinan al uso agrícola, 42 para uso público-urbano, 17 para uso doméstico, 1 para uso pecuario, 29 tienen un uso múltiple y 3 más para uso industrial. De los 2 manantiales, uno es para uso público urbano y el otro para uso doméstico.

El volumen de extracción asciende a **6.3 hm^3 anuales**, de los cuales 3.5 hm^3 (55.6 %) es utilizado para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 1.4 hm^3 (22.2%) se destinan al uso agrícola, 1.1 hm^3 (17.5 %) son para uso industrial, y el restante 0.3 hm^3 (4.8 %) se dedica al suministro de los usos múltiples, doméstico y pecuario.

A través de los **2 manantiales** identificados, se descarga un caudal pequeño de 3 lps, se estima que se descarga un volumen equivalente a **0.01 hm³ anuales**, que para fines del balance de aguas subterráneas se considera despreciable.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2006-2017, en una superficie de 584 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente:

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

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 del acuífero:

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

7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (R_i). Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano y agrícola son pequeños, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga incidental.

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 ($\Delta V(S)$), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

Rv = Recarga vertical

Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal

B = Bombeo

Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Rv = B + Sh \pm \Delta V(S) - Eh \quad (2)}$$

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 acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, 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 la llanura y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

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 2017 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

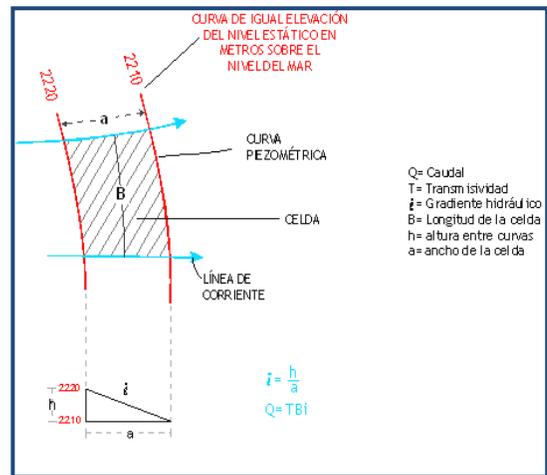
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **5.7 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2017)

| CELDA | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | h_2-h_1 (m) | Gradiente i | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|--------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| E1 | 3260 | 2720 | 10 | 0.0037 | 0.0008 | 0.0096 | 0.3 |
| E2 | 5650 | 1250 | 50 | 0.0400 | 0.0001 | 0.0226 | 0.7 |
| E3 | 3650 | 1050 | 50 | 0.0476 | 0.0001 | 0.0174 | 0.5 |
| E4 | 9650 | 3730 | 20 | 0.0054 | 0.0003 | 0.0155 | 0.5 |
| E5 | 7200 | 4050 | 20 | 0.0049 | 0.0005 | 0.0178 | 0.6 |
| E6 | 4700 | 1000 | 40 | 0.0400 | 0.0001 | 0.0188 | 0.6 |
| E7 | 5100 | 1100 | 40 | 0.0364 | 0.0001 | 0.0185 | 0.6 |
| E8 | 6800 | 1150 | 40 | 0.0348 | 0.0001 | 0.0237 | 0.7 |
| E9 | 2500 | 1600 | 30 | 0.0188 | 0.0002 | 0.0094 | 0.3 |
| E10 | 5800 | 2000 | 40 | 0.0200 | 0.0002 | 0.0232 | 0.7 |
| E11 | 5250 | 1300 | 10 | 0.0077 | 0.0001 | 0.0040 | 0.1 |
| E12 | 5150 | 1700 | 10 | 0.0059 | 0.0001 | 0.0030 | 0.1 |
| TOTAL | | | | | | | 5.7 |

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos en este acuífero adaptados al espesor saturado de las distintas zonas.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **6.3 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2017, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **0.3 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2017)

| CELDA | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | h_2-h_1 (m) | Gradiente i | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|--------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| S1 | 790 | 3800 | 5 | 0.0013 | 0.0080 | 0.0083 | 0.3 |
| TOTAL | | | | | | | 0.3 |

7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2006-2017 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.001, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

h = Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -0.9 hm^3 , es decir, un promedio anual de -0.1 hm^3 anuales.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2006-2017)

| Evolución (m) | Evolución media (m) | Área (km ²) | Sy | ΔV(S) (hm ³ /año) |
|---------------|-----------------------|-------------------------|--------------|------------------------------|
| -10 | -10.0 | 8.4 | 0.001 | -0.1 |
| -5 a -10 | -7.5 | 52.2 | 0.001 | -0.4 |
| -1 a -5 | -4.0 | 106.4 | 0.001 | -0.4 |
| | TOTAL | 167.0 | TOTAL | -0.9 |
| | Promedio anual | | | -0.1 |

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 6.3 + 0.3 - 0.1 - 5.7$$

$$R_v = 0.8$$

De esta manera, la recarga total media anual está definida por la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.8 + 5.7$$

$$R = 6.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **6.5 hm³ anuales**, 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 el caso de este acuífero su valor es de 0.3 hm³ anuales que corresponden a las salidas subterráneas hacia el acuífero Vicente Guerrero-Poanas del estado de Durango, **DNC = 0.3 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **5'436,816 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del 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 que 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 6.5 - 0.3 - 5.436816 \\ \text{DMA} &= 0.763184 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **763,184 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Estudio para la reactivación de redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en los acuíferos Hidalgo y Sabinas. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Hidalgo, estado de Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1970. Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el Estado de Zacatecas. Realizado por Consultec Ingenieros Asociados, S.C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Región de Saín Alto, en el Estado de Zacatecas. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA).

Gobierno del Estado de Zacatecas, Secretaría de Fomento Agropecuario, 2000. Estudio de Evaluación de la Disponibilidad de Agua Subterránea en las Zonas de El Palmar y Saín Alto, en el Estado de Zacatecas. Elaborado por Consultores en Agua Subterránea, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera F13-B34 "Chalchihuites". Escala. 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológico-Minera F13-B25 "Sombrerete". Escala. 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico-Minera F13-B15 "González Ortega". Escala. 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2012. Carta Geológico-Minera F13-B14 "La Joya". Escala. 1:50,000.