

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Sabinas (3201), Estado
de Zacatecas***

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

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

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

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

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

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

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE ZACATECAS							
3201	SABINAS	13.7	2.5	10.162843	3.0	1.037158	0.000000

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



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

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO SABINAS (3201), ESTADO DE ZACATECAS***

México, D.F., Julio de 2013

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	1
	Antecedentes	1
1.1.	Localización	1
1.2.	Situación administrativa del acuífero	3
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3.	FISIOGRAFÍA	5
3.1.	Provincia fisiográfica	5
3.2.	Clima	6
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA	8
4.1.	Estratigrafía	9
4.2.	Geología estructural	13
4.3.	Geología del subsuelo	14
5.	HIDROGEOLOGÍA	16
5.1.	Tipo de acuífero	16
5.2.	Parámetros hidráulicos	16
5.3.	Piezometría	16
5.4.	Comportamiento hidráulico	17
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	17
5.4.2.	Elevación del nivel estático	18
5.4.3.	Evolución del nivel estático	19
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	20
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	21
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	21
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.	Bombeo (B)	24
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.3.	Evapotranspiración (ETR)	24
7.2.4.	Descarga de Manantiales (Dm)	26
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8.	DISPONIBILIDAD	27
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	27
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	27
8.3.	Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)	28
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)	28
9.	BIBLIOGRAFÍA	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

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 Sabinas, definido con la clave 3201 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción occidental del estado de Zacatecas, en su límite con el estado de Durango, entre los paralelos 23° 16' y 24° 41' de latitud norte y entre los meridianos 103°28' y 104° 04' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,488 km².

Limita al norte con el acuífero Hidalgo, al este con los acuíferos Saín Alto y Ábrego; al sur con el acuífero Corrales; todos ellos pertenecientes al Estado de Zacatecas; al oeste con el acuífero Vicente Guerrero-Poanas, del Estado de Durango (figura 1). Geopolíticamente, comprende casi la totalidad del municipio Chalchihuites y parte de Sombrerete.

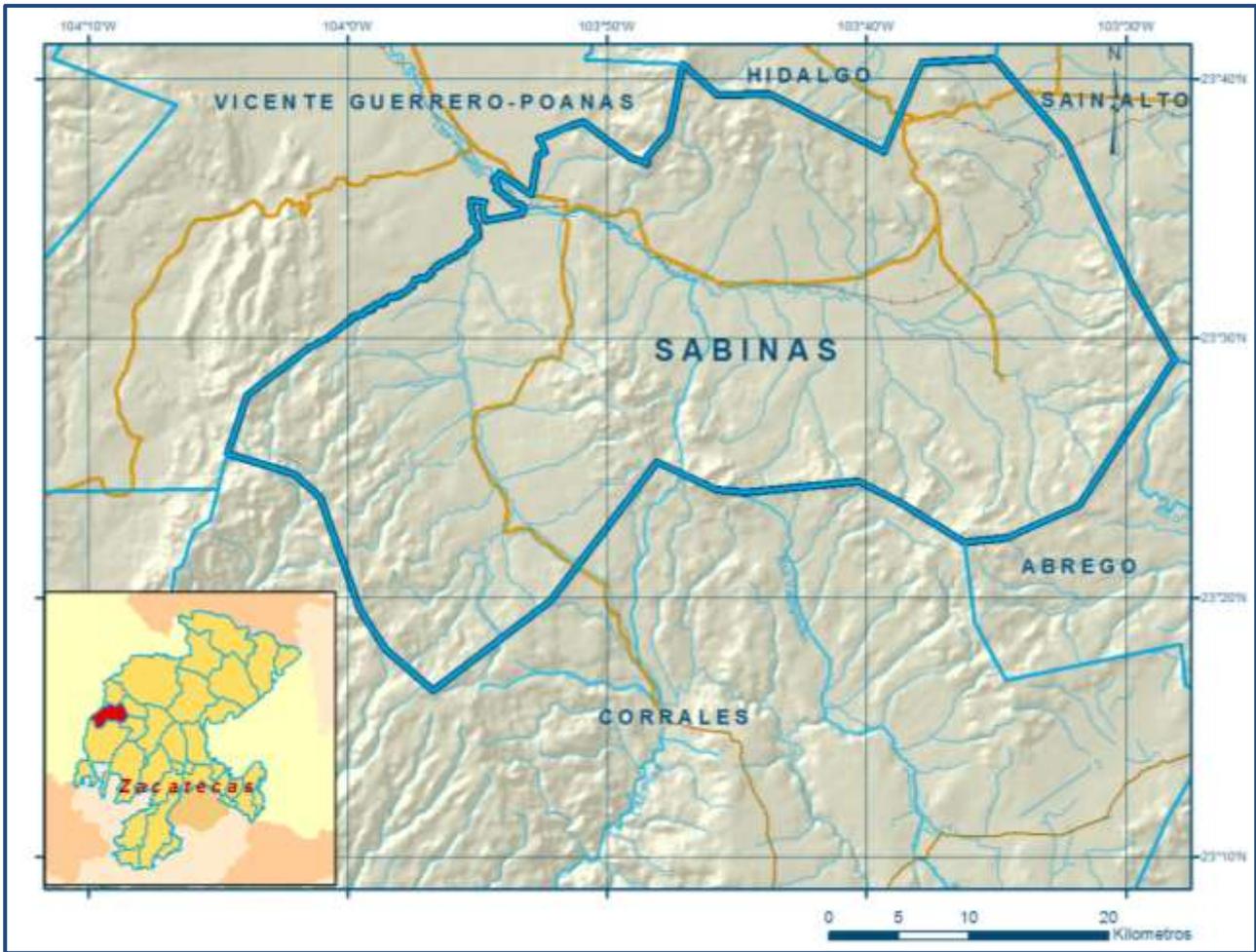


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 3201 SABINAS

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	39	18.9	23	37	10.9	
2	103	37	51.7	23	40	38.0	
3	103	35	3.3	23	40	47.6	
4	103	32	17.3	23	37	34.8	
5	103	29	43.0	23	32	1.0	
6	103	28	8.0	23	29	11.5	
7	103	31	47.5	23	23	33.7	
8	103	34	35.6	23	22	18.7	
9	103	36	14.5	23	22	6.3	
10	103	38	51.2	23	23	45.1	
11	103	40	18.6	23	24	27.9	
12	103	44	40.8	23	24	3.2	
13	103	45	47.3	23	24	8.9	
14	103	48	5.1	23	25	13.5	
15	103	52	12.1	23	19	53.3	
16	103	56	42.9	23	16	25.2	
17	103	58	32.0	23	17	58.8	
18	103	59	32.0	23	19	30.5	
19	104	1	4.7	23	23	53.2	
20	104	2	4.0	23	24	45.0	
21	104	4	38.4	23	25	33.8	DEL 21 AL 22 POR EL LIMITE ESTATAL
22	103	47	5.2	23	40	35.7	
23	103	45	45.1	23	39	24.1	
24	103	43	44.2	23	39	25.7	
1	103	39	18.9	23	37	10.9	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Sabinas pertenece al Organismo de Cuenca III “Pacífico Norte” 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 05 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 2013, los municipios Chalchihuites y Sombrerete se clasifican como zona de disponibilidad 7. El uso principal es el público-urbano. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca “Ríos Presidio al San Pedro”, instalado el 15 de junio de 2000; en su territorio 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 se han realizado algunos estudios de exploración geológica y minera. Con respecto a estudios hidrogeológicos de evaluación, se han desarrollado varios, algunos a escala regional, de los cuales a continuación se citan los más importantes:

PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1980. 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 al acuífero 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 tuvo como objetivos definir las estructuras y unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea 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 terciarios poco cementados; y otro de permeabilidad secundaria alojada en tobas riolíticas y las lutitas-areniscas de la Formación Caracol. El agua es 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. 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 es 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.

ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN HDROGEOLÓGICA DEL PROYECTO MINERO CHALCHIHUITES, MUNICIPIO DE CHALCHIHUITES, ZACATECAS. Realizado en 2013 por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente IDEAS, S.A. de C.V., para Grupo México S. A. B. de C.V. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan 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 las estribaciones orientales de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, en su límite con la Provincia Fisiográfica Meseta Central. Por otro lado, de acuerdo

con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la Subprovincia denominada Sierras y Llanuras de Durango, en su límite con la Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos. Su extremo suroccidental se ubica en la Subprovincia Gran Meseta y Cañadas Duranguenses.

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 Terciario 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 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.

La Sierra de Tlaxcala situada al occidente de Chalchihuites, así como la Sierra de Chalchihuites y la Sierra Negra son las estribaciones orientales de la Sierra Madre Occidental; al oriente de la región. Aproximadamente a 200 km de Chalchihuites, se localiza la Meseta Central, que se caracteriza por sus llanuras altas, de 2,000 a 2,200 msnm, limitadas por sierras alargadas y angostas, que en general están orientadas en dirección NW-SE. La Sierra Madre Occidental tiene altitudes promedio de 2,100-2,200 msnm con altitudes máximas que alcanzan los 3,000 msnm. Las mayores elevaciones de la región son la Sierra Negra y Chalchihuites, que alcanzan elevaciones del orden de 2,600 a 3,000 msnm.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, el clima que prevalece en la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano, estación se caracteriza por ser fresca y de larga duración.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de seis estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero; 4 ubicadas en la superficie del acuífero: Chalchihuites, Sombrerete, Felipe Ángeles y Mesillas; una ubicada en el acuífero Corrales vecino al sur: Jiménez de Teúl; y otra ubicada muy cerca del poblado Gualterio: Súchil, ubicada en la localidad del mismo nombre, en el estado de Durango. Con los registros obtenidos para el periodo 1980-2011 y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **488 mm/año** y **16.1°C** respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se

registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de total estiaje ocurre de marzo a mayo.

3.3. Hidrografía

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica RH 11 “Río Presidio-San Pedro”, Subregión Hidrológica “San Pedro-Rosa Morada y Acaponeta” cuenca del Río San Pedro, subcuenca Río Súchil. Debido a que la lámina media anual de precipitación es baja, los arroyos son escasos y de tipo intermitente, cuyos escurrimientos desaparecen hacia el centro de los valles en los que el material aluvial alcanza los máximos espesores. Como es característico de la Sierra Madre Occidental, sus grandes ríos nacen muy cerca de la Meseta Central, en donde las corrientes de agua los alimentan y confluyen a los Ríos San Pedro y Grande de Santiago. Tal es el caso del Río Antonio, que es el principal dren de la zona.

En su porción nororiental se identifica el parteaguas hidrográfico representado por el flanco sur de la Sierra de Sombrerete, donde se origina el Río San Antonio, cuyo flujo sigue una dirección preferencial de oriente a poniente; durante su recorrido confluyen a él los escurrimientos de arroyos perpendiculares, entre los que destacan los arroyos Mayo y San Isidro. El río cambia de nombre a Río Súchil después de la comunidad Gualterio, una vez que se le unió el Arroyo Chalchihuites, ya en territorio del Estado de Durango. Aguas abajo cambia a Río Nombre de Dios, para después unirse al Río Mezquital hasta desembocar al Río San Pedro, que finalmente vierte sus aguas en el océano Pacífico, en la porción central del estado de Nayarit.

Salvo algunos bordos para abrevadero y los pozos que abastecen a la minera y a los centros de población, no existe infraestructura hidráulica de mayor importancia en la zona.

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. 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 de Sombrerete, 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 3100 msnm.

El parteaguas hidrográfico de la porción sur del acuífero, alcanza elevaciones de 3000 msnm, cerca de donde se ubica la comunidad Sierra Prieta. Por otro lado, las elevaciones mínimas, del orden de los 2120 msnm, se presentan en la zona central del acuífero, entre las comunidades La Concordia y Buenavista. Las erupciones volcánicas explosivas y derrames lávicos de tipo ácido, dieron origen a

las mesetas, las cuales presentan un basculamiento hacia el suroeste y están disectadas por la acción erosiva de los arroyos. Los esfuerzos distensivos en el área provocaron cuencas tectónicas, rellenadas posteriormente 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.

La litología de lutitas y areniscas presente en el área de estudio, provoca el desarrollo de un drenaje tipo dendrítico con enrejado denso, controlado por la disposición de los estratos y fracturas. Este rasgo es característico de rocas poco permeables. El drenaje presente en la zona es de tipo dendrítico y paralelo.

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 Tectonoestratigráficos, 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 polimítico, 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 Terciario, 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. De manera

contemporánea, 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 intrusivas 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 tobas arenosas 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 principalmente riolítica 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 1:50,000 del SGM, 1999 y 2001, respectivamente).

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 (figura 2). 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 ocre, 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 es discordante con los conglomerados polimícticos del Mioceno, con las rocas volcánicas del Terciario y con los intrusivos.

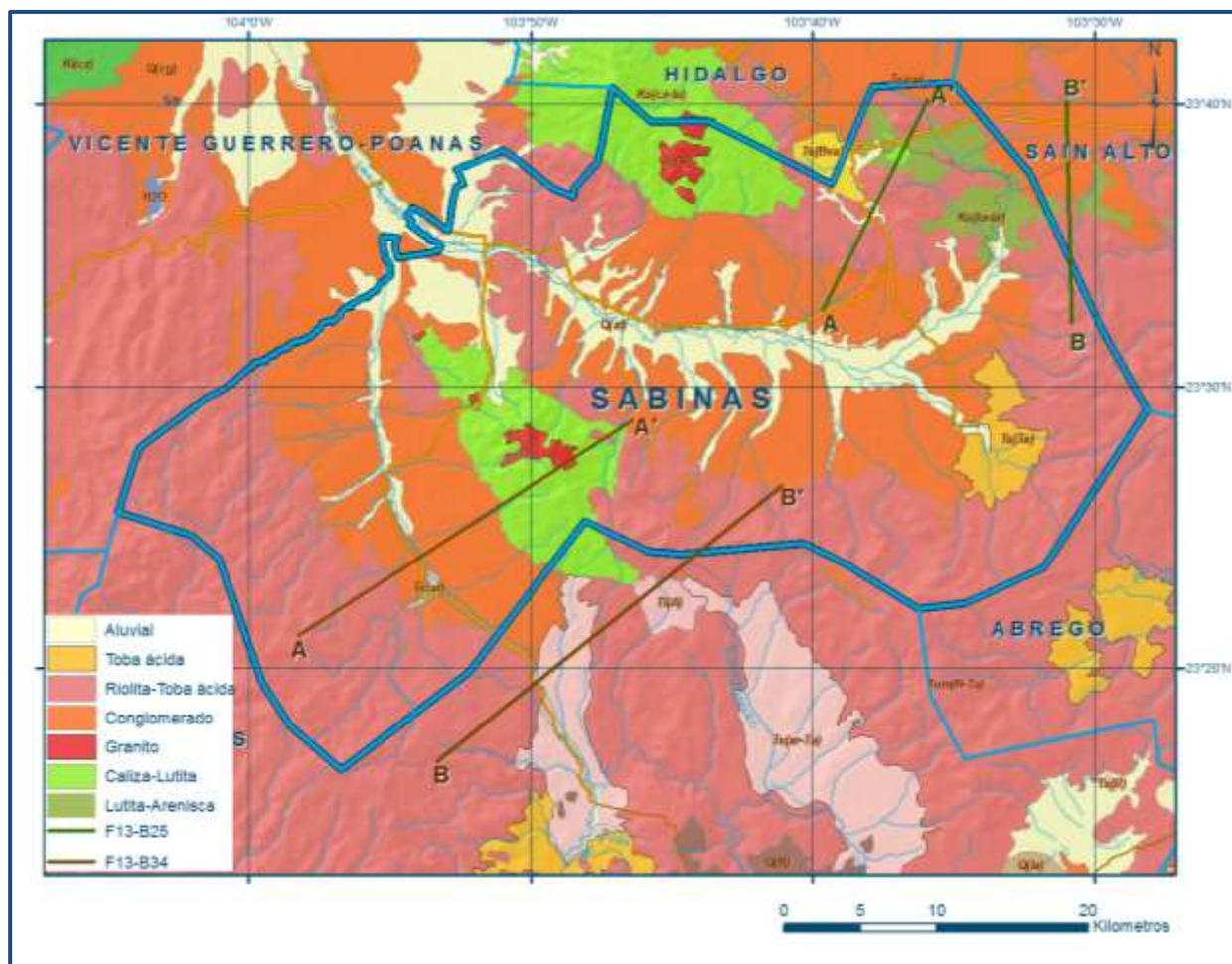


Figura 2. Geología general del acuífero

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-orienté y sur-orienté 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.

Formación Indidura

Consiste principalmente de dos series diferentes: en la base conformada por calizas arcillosas dispuestas 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 cima 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 Mexcala 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 de color gris oscuro con bandas de pedernal de color 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 recristalizadas de color gris claro, que en roca fresca presenta un color negro de textura wackestone y vetas de calcita. Su estratificación ondulante indica una depositación 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 Terciario. Está afectada por los intrusivos.

TERCIARIO (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 producto de la reactivación de la cámara magmática durante el Oligoceno, relacionado a cuerpos granodioríticos-cuarzomonzoníticos.

Riolita

Roca volcánica de color rosa a pardo que intemperiza a 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, feldespato 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 Terciario y su edad corresponde al Oligoceno-Mioceno. Se correlaciona con las unidades volcánicas de la Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental, asociadas 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 de tonos violetas, en algunas localidades brechoide y arenosa. Subyace a basaltos y conglomerados, su edad corresponde al Terciario. Por su posición estratigráfica se le asignó una edad del Oligoceno y se correlaciona con las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

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 las Sierras de Sombrerete y de Chalchihuites y en el Cerro La Gloria. En esta última localidad se observan varias fases magmáticas que varían de granodiorita a cuarzomonzonita, de textura fanerítica y porfídica equigranular, de grano grueso, de color gris claro con tonalidades blanquecinas y rosáceas.

Conglomerado Polimíctico

Compuesto 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. Se presentan semiconsolidados, mal clasificados y con ligera oxidación. Sus fragmentos varían en tamaño desde arenas, gravas hasta guijarros. 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 Rio 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 Terciario 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 norte y sur por dos zonas de fallas que presentan una 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 el vulcanismo de naturaleza ignimbrítica, también se presenta un evento distensivo que reactivó 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 del acuífero existen dos direcciones de fallas, la primera tiene una orientación NW-SE con echados al SW, que se observa en la Sierra 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 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).

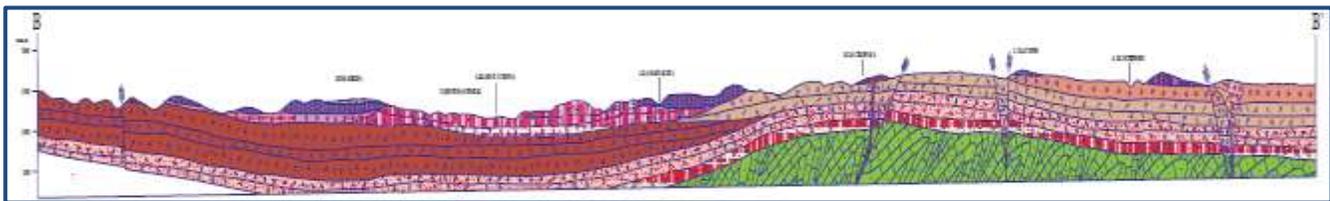
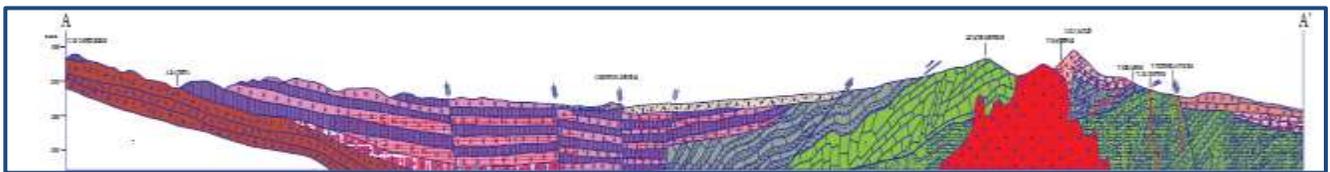
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica generada en 2006 y 2013 y por correlación con acuíferos vecinos, se determina que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares y los conglomerados que rellenan los valles. 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.

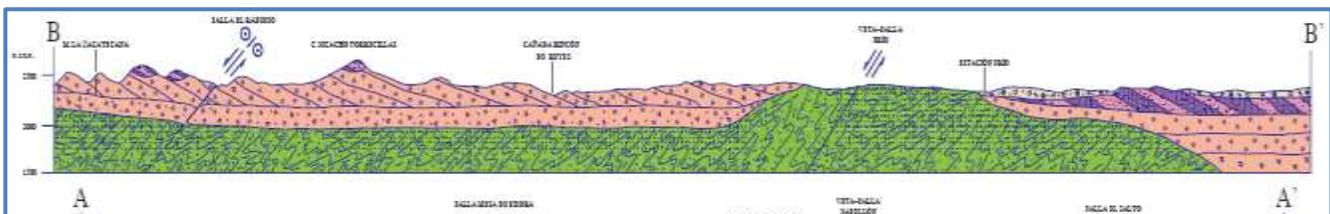
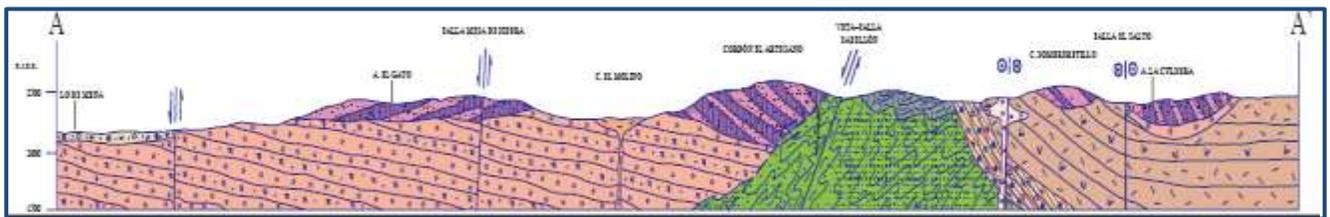
El predominio de sedimentos granulares areno-arcillosos y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, le confieren baja permeabilidad al acuífero; los bajos caudales que aporta sólo son suficientes para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las fronteras y barreras 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. En otras localidades está representado por rocas intrusivas graníticas. La interpretación de los sondeos gravimétricos y de resistividad realizados en 2013, permite 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).



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B34 "Chalchihuites", Zacatecas. Esc. 1:50,000 (SGM, 1999)



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-B25 "Sombrerete", Zacatecas. Esc. 1:50,000 (SGM, 2001)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Esta unidad inferior puede presentar condiciones de confinamiento o semiconfinamiento debido a que en la secuencia de rocas sedimentarias presenta alternancia con rocas arcillosas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2013, se ejecutaron 7 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos analíticos convencionales de Neuman, Theis y Jacob. Los resultados de su interpretación indican que los valores medios de transmisividad varían entre $4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Adicionalmente, en el estudio realizado en 2006, se realizaron 6 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 8 horas), también en etapas de abatimiento y recuperación. Los valores obtenidos de transmisividad varían de 4.4×10^{-5} a $18.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores de conductividad hidráulica varían de 1.3×10^{-7} y $3.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (**0.01 0.3 m/d**). Ambos parámetros, transmisividad y conductividad hidráulica, son representativos de materiales de granulometría fina de baja permeabilidad.

Sólo una de las pruebas de bombeo realizadas en 2006 contó con pozo de observación, de la que su pudo estimar un valor de coeficiente de almacenamiento de 0.0002. Debido a que los valores de evolución únicamente se registran en algunas zonas a lo largo del cauce del Río San Antonio y del Arroyo Chalchihuites, para fines del balance de aguas subterráneas se adoptó un valor de rendimiento específico de 0.1.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios realizados en 2006 y 2013.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2013 presenta valores que varían desde algunos metros en el cauce del Río San Antonio y en la parte baja de la cuenca, en las inmediaciones del poblado Gualterio, hasta 200 m, que se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles. Los niveles estáticos someros se ubican en la cuenca alta del Río San Antonio, entre las localidades Felipe Ángeles y Troncones (donde se explotan mediante norias) y en la cuenca baja, en el límite con el estado de Durango; en tanto que los más profundos se registran en la cuenca alta del Arroyo Chalchihuites y entre las localidades Rancho Nuevo del Carmen Providencia (figura 4).

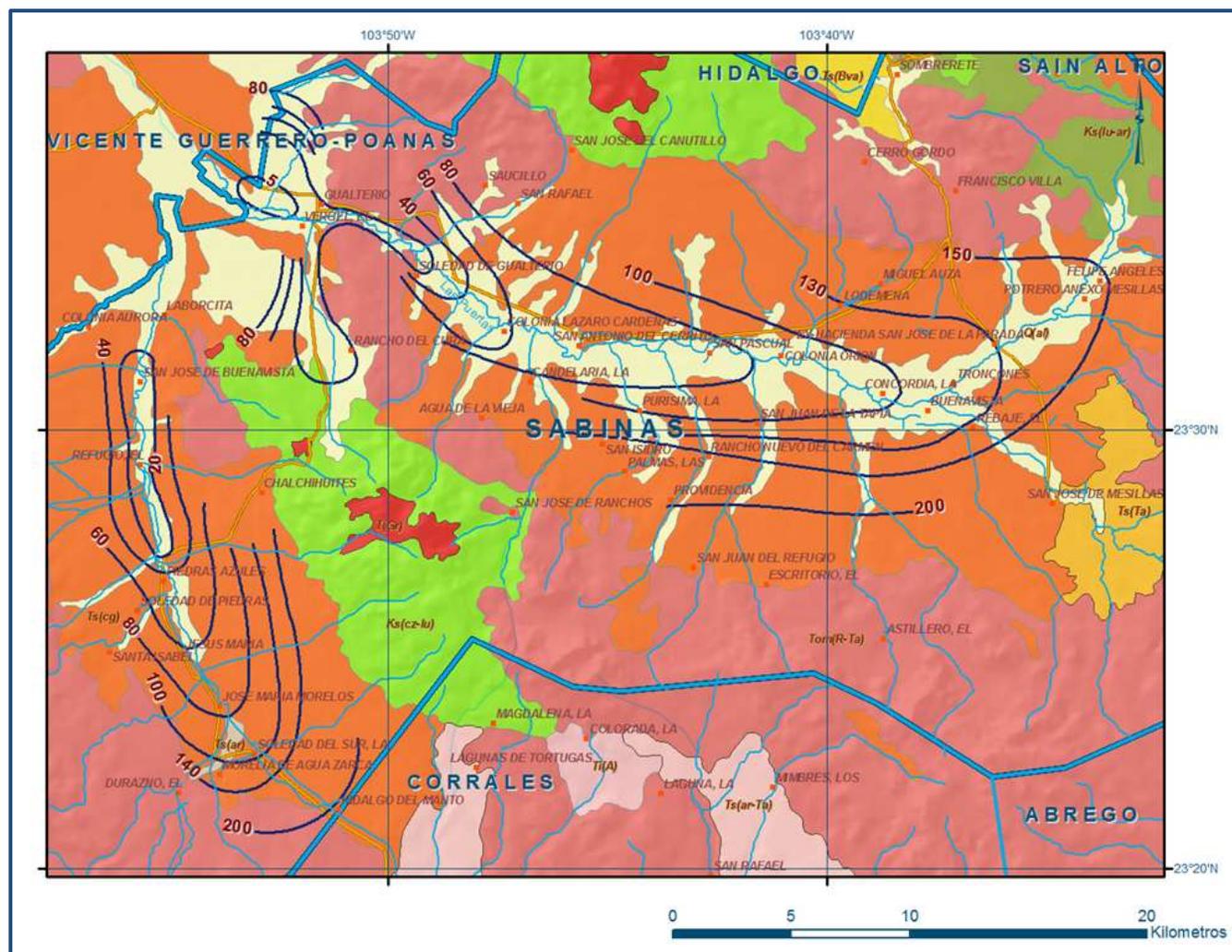


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2013, se observa que se registran valores que varían de 2300 a 2010 msnm. Las menores elevaciones, de 2010 a 2050 msnm, se presentan en la porción oriental del acuífero, en la zona de confluencia del Arroyo Chalchihuites con el Río San Antonio, en el límite con el estado de Durango. Las mayores elevaciones, de 2100 a 2300, se registran en las porciones altas de la cuencas del Arroyo Chalchihuites y Río San Antonio, desde donde descienden gradualmente, al igual que la profundidad, por efecto topográfico hacia el centro de los valles, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur y este-oeste, respectivamente, alimentada por los flujos provenientes de los flancos de las sierras que delimitan los valles (figura 5).

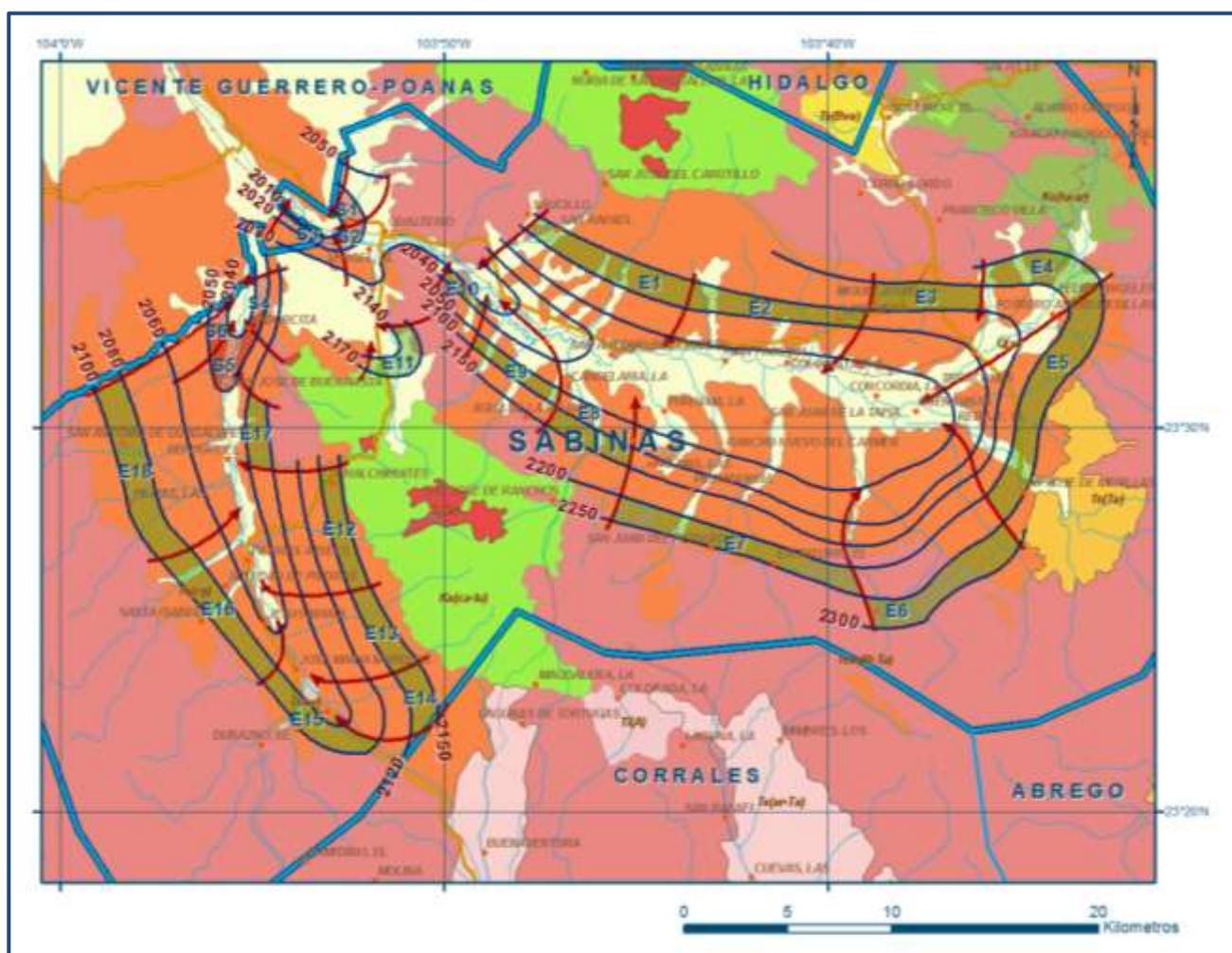


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2013, se observa que se registran valores tanto positivos como negativos de 1 a 2 m, de manera puntual y a lo largo del cauce del Río San Antonio y del Arroyo Chalchihuites, que representan un promedio anual de 0.2 m. Para la mayor parte de la superficie de explotación de los dos valles los niveles del agua subterránea no presentan variaciones importantes en su posición. Mientras que a lo largo de la mayor parte del curso del Río San Antonio se registró una recuperación de 1 m en el periodo analizado, es decir 0.15 m anuales, en el Arroyo Chalchihuites se observó un abatimiento de 2 m, que representa 0.3 m anuales (figura 6).

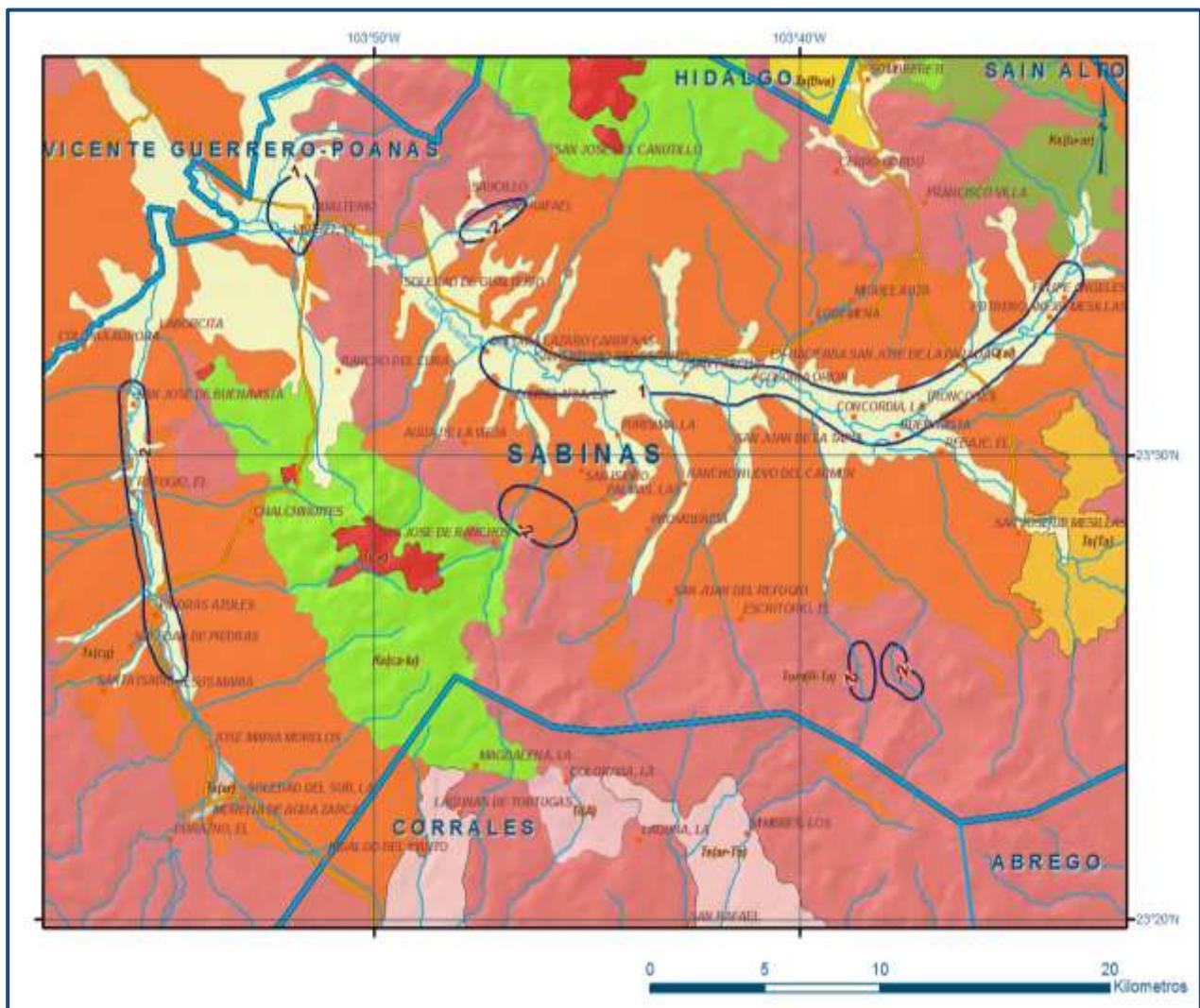


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2006- 2013)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en los estudios realizados en 2006 y 2013, se tomaron 15 y 10 muestras de agua subterránea, respectivamente, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio, así como metales (níquel, mercurio, manganeso, hierro, cromo, cadmio, arsénico, zinc y plomo, Conagua, 2006).

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 100 a 580 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD, para el agua destinada al consumo humano. Los valores más altos, de 500 a 600 mg/l, se registran en la porción centro-occidental del acuífero y los menores al oriente y noreste, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo, de este a oeste. Con respecto a los metales, sólo una muestra presentó 0.64 mg/l de hierro que supera el límite máximo permitido de 0.2 mg/l que establece la norma mexicana mencionada.

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 no rebasan el límite 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sus valores extremos son de 150 y 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas varían de 18.0 a 32.4 °C y el pH varía de 6.4 a 8.3.

Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, predomina la familia bicarbonatada cálcica y en menor proporción la familia a bicarbonatada-sódica; ambas representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia. La primera asociada a las rocas calizas y la segunda a las rocas volcánicas, 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 se clasifican como C_1-S_1 que representa contenido bajo de sales y baja concentración de sodio intercambiable, y C_2-S_1 que presenta contenido medio de sales y baja concentración de sodio, que se consideran aptas para el uso agrícola.

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 2013, se registraron un total de 132 obras que aprovechan el agua subterránea: 92 pozos y 38 norias y 2 manantiales; todas ellas activas.

El volumen de extracción asciende a **3.0 hm³ anuales**, de los cuales 2.2 hm³ (73.3 %) se destinan al uso público-urbano, 0.2 hm³ (6.7 %) para uso agrícola, 0.4 hm³ (13.3 %) para uso industrial y 0.2 hm³ (6.7 %) para usos doméstico y pecuario.

Adicionalmente, a través de **manantiales** se descarga un caudal de 109 lps, que representa un volumen anual de **3.4 hm³**, destinados a los usos doméstico, recreativo y agrícola

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2006-2013, en una superficie de **650 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 el valle, 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 inducida, 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 la 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 riego agrícola y para uso público-urbano son incipientes y no existen poblaciones urbanas importantes, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga inducida, por lo que $R_i = 0$.

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

- R_v :** Recarga vertical
- E_h :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B :** Bombeo
- S_h :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- D_m :** Descarga a través de manantiales
- ETR :** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del 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 el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. Con base en esta

configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

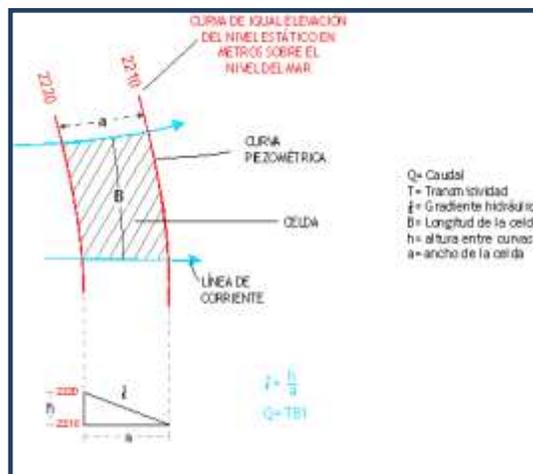
Donde:

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 **12.7 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	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	8235	1180	50	0.0424	0.00010	0.0349	1.1
E2	8705	1410	50	0.0355	0.00010	0.0309	1.0
E3	5650	1180	50	0.0424	0.00020	0.0479	1.5
E4	4705	1650	50	0.0303	0.00020	0.0285	0.9
E5	11765	1410	50	0.0355	0.00010	0.0417	1.3
E6	9410	1180	50	0.0424	0.00001	0.0040	0.1
E7	12470	1080	50	0.0463	0.00010	0.0577	1.8
E8	4235	940	50	0.0532	0.00010	0.0225	0.7
E9	5410	825	50	0.0606	0.00010	0.0328	1.0
E10	3765	705	10	0.0142	0.00010	0.0053	0.2
E11	4705	940	30	0.0319	0.00010	0.0150	0.5
E12	5650	1180	30	0.0254	0.00010	0.0144	0.5
E13	4705	1298	30	0.0231	0.00010	0.0109	0.3
E14	3765	1880	30	0.0160	0.00010	0.0060	0.2
E15	5580	940	20	0.0213	0.00010	0.0119	0.4
E16	8000	1060	20	0.0189	0.00010	0.0151	0.5
E17	3530	940	20	0.0213	0.00010	0.0075	0.2
E18	9410	1175	20	0.0170	0.00010	0.0160	0.5
Total entradas							12.7

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en 2006 y 2013, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre mediante bombeo (B); de manera natural a través de flujo subterráneo (Sh), evapotranspiración (ETR) y por manantiales (Dm). No existen descargas naturales por flujo base

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **3.0 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 para el año 2013 (figura 5); su valor estimado es de **0.8 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	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	1880	1180	10	0.0085	0.0001	0.0016	0.05
S2	1150	940	10	0.0106	0.0001	0.0012	0.04
S3	4000	750	10	0.0133	0.0001	0.0053	0.17
S4	3060	825	20	0.0242	0.0001	0.0074	0.23
S5	1880	1410	20	0.0142	0.0001	0.0027	0.08
S6	3060	1060	20	0.0189	0.0001	0.0058	0.18
Total salidas							0.76

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

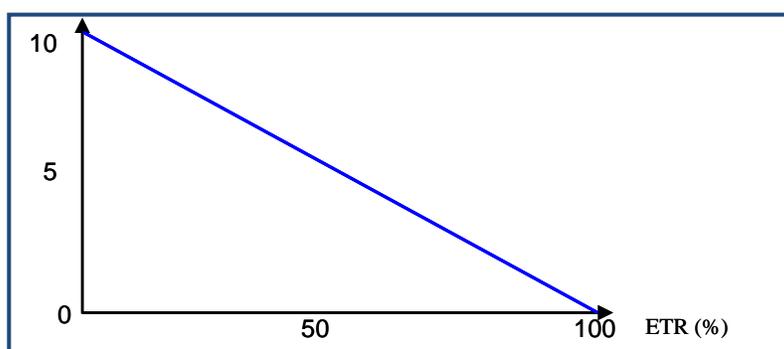
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc,

que se muestra a continuación considerando el valor promedio anual de temperatura (16.1 °C) y precipitación (488 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) =	16.1		
P(mm) =	488	P ² =	238144
L =	911.16405	L ² =	830219.926
ETR (mm)	447.9		

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%, a 2 m el 80% etc.



Existen dos zonas dentro del área de balance en las que 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 las plantas en este tipo de climas. Una de ellas, A1 de 13.5 km² de extensión, se localiza en la cuenca alta del Río San Antonio, a lo largo de su curso, entre Felipe Ángeles y Troncones (donde se explotan mediante norias), en la que la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 4 m. La segunda, A2 con una superficie de 8 km², se ubica en la cuenca baja del Río San Antonio, en las inmediaciones del poblado Gualterio, en el límite con el Estado de Durango, donde la profundidad promedio al nivel freático es de 2 m.

Si consideramos estas áreas donde se registran niveles freáticos someros, con cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas susceptibles de evapotranspirar y su profundidad promedio al nivel del agua subterránea, de acuerdo con el valor de la lámina de ETR obtenida y la gráfica anterior:

$$ETR_{A1} = 13.5 \text{ km}^2 (0.4479 \text{ m}) (0.6) = 3.6$$

$$ETR_{A2} = 8.0 \text{ km}^2 (0.4479 \text{ m}) (0.8) = 2.9$$

Por lo tanto, **ETR = 6.5 hm³/año**

7.2.4. Descarga de Manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 2 pequeños manantiales en la cuenca baja del Río San Antonio, en las inmediaciones del poblado Gualterio, que en conjunto descargan 109 lps, es decir un volumen estimado de **3.4 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2013 muestra que se registran valores puntuales, tanto positivos como negativos, a lo largo del cauce del Río San Antonio y del Arroyo Chalchihuites cuyo volumen almacenado o drenado, respectivamente, se anulan. Para la mayor parte de la superficie de explotación de los dos valles los niveles del agua subterránea no presentan variaciones importantes en su posición. Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no presenta alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción.

Por ello se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **$\Delta V(S) = 0$** .

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:

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm \pm \Delta V(S) - Eh$$

$$Rv = 3.0 + 0.8 + 6.5 + 3.4 \pm 0.0 - 12.7$$

$$Rv = 1.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas:

$$\begin{aligned}R_t &= R_v + E_h \\R_t &= 1.0 + 12.7 \\R_t &= 13.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

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

Donde:

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

Rt: Recarga total media anual

DNCOM: Descarga natural comprometida

VCAS: Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso su valor es **13.7 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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

Para el caso del acuífero Sabinas, su valor es de **2.5 hm³ anuales**, de los cuales 0.8 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero vecino Vicente Guerrero-Poanas en el estado de Durango, y 1.7 hm³ correspondientes al 50% de la descarga de los manantiales; el

volumen restante podrá aprovecharse dentro del acuífero Sabinas. Con esto se promoverá la regularización de usuarios y el desarrollo en ambos lados del límite que comparten acuíferos vecinos entre estados.

DNCOM = 2.5 hm³ anuales.

8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2013** es de **8'103,295 m³/año**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS}$$

$$\mathbf{DAS = 13.7 - 2.5 - 8.103295}$$

$$\mathbf{DAS = 3.096705 \text{ hm}^3/\text{año.}}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **3'096,705 m³** para otorgar nuevas concesiones.

Sin embargo, es necesario considerar que el volumen de extracción real es menor que el volumen concesionado, debido a que existen aprovechamientos que físicamente se encuentran en acuíferos vecinos y su volumen concesionado está registrado e inscrito en el REPGA con cargo al acuífero Sabinas.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2006. Estudio para la Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico y de Calidad del Agua de los Acuíferos Hidalgo y Sabinas, en el Estado de Zacatecas”. Elaborado por GEOPSA, S.A. de C.V.

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.

Grupo México S. A. B. de C.V., 2013. Estudio de Caracterización del Proyecto Minero Chalchihuites, municipio de Chalchihuites, Zacatecas. Elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente IDEAS, S.A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1980. Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el Estado de Zacatecas. Elaborado por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A.

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

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológica-Minera F13-B34 “Chalchihuites”, Zacatecas. Escala. 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológica-Minera F13-B25 “Sombrerete”, Zacatecas. Escala. 1:50,000.