



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CALERA (3225) ESTADO DE ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	9
3.1	Provincia fisiográfica.....	9
3.2	Clima.....	10
3.3	Hidrografía.....	11
3.4	Geomorfología.....	12
4	GEOLOGÍA.....	13
4.1	Estratigrafía.....	15
4.2	Geología estructural.....	25
4.3	Geología del subsuelo.....	27
5	HIDROGEOLOGÍA.....	29
5.1	Tipo de acuífero.....	29
5.2	Parámetros hidráulicos.....	29
5.3	Piezometría.....	30
5.4	Comportamiento hidráulico.....	30
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	30
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	31
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	32
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	33
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	34
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	35
7.1	Entradas.....	35
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	36
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	36
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	37
7.2	Salidas.....	38
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	38
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	38
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	38
8	DISPONIBILIDAD.....	40
8.1	Recarga total media anual (R).....	40
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	40
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	41
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	41
9	BIBLIOGRAFÍA.....	42

1 GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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

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

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

1.1 Localización

El acuífero Calera, definido con la clave 3225 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Zacatecas; entre los paralelos 22°41' y 23° 24' de latitud norte y entre los meridianos 102°33' y 103° 01' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,226 km².

Limita al norte con los acuíferos Aguanaval y Guadalupe de Las Corrientes, al noreste y este con Chupaderos, al sur con Benito Juárez, al suroeste con Jerez y al oeste también con Aguanaval; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1).

Geopolíticamente el área que cubre el acuífero comprende la totalidad de los municipios General Enrique Estrada y Morelos, la mayor parte de Calera, Frenillo y Zacatecas así como porciones menores y pequeñas de Pánuco, Vetagrande, Jerez y Villa de Cos.

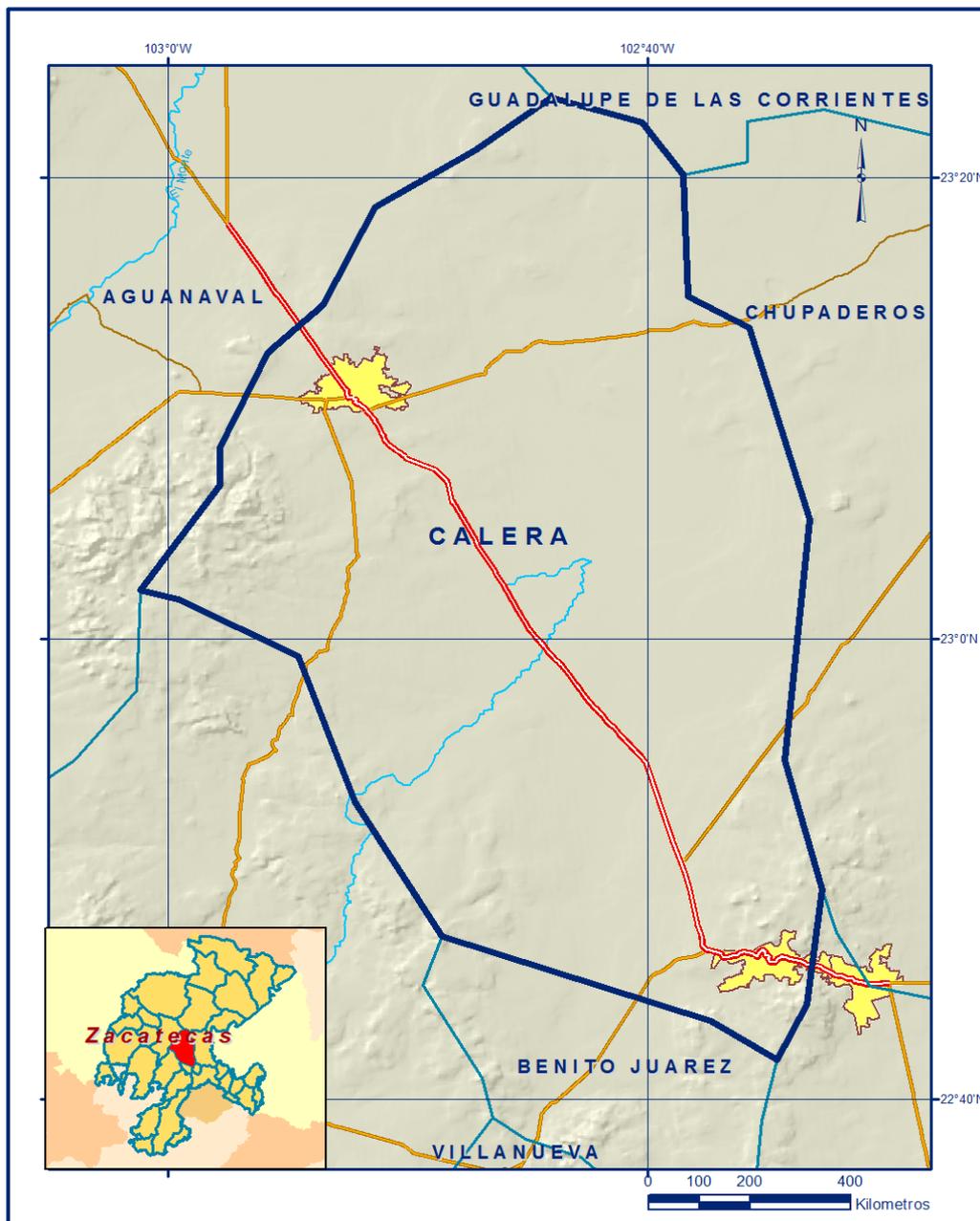


Figura 1. Localización del Acuífero.

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 3225 CALERA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	102	38	319	23	20	5.3
2	102	38	18.9	23	14	50.0
3	102	35	45.8	23	13	28.7
4	102	33	15.7	23	5	8.6
5	102	34	18.2	22	54	43.4
6	102	32	44.0	22	49	6.8
7	102	33	22.0	22	44	8.9
8	102	34	37.8	22	41	43.2
9	102	37	23.0	22	43	23.7
10	102	48	36.1	22	47	3.9
11	102	52	13.0	22	52	55.5
12	102	54	35.7	22	59	12.4
13	102	59	34.9	23	1	41.1
14	103	1	10.1	23	2	4.9
15	102	57	50.5	23	6	39.0
16	102	57	52.0	23	8	17.0
17	102	55	51.7	23	12	23.3
18	102	53	32.1	23	14	27.2
19	102	51	22.4	23	18	40.8
20	102	47	12.7	23	21	10.2
21	102	44	2.3	23	23	26.2
22	102	40	15.2	23	22	22.7
1	102	38	319	23	20	5.3

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, al Consejo de Cuenca Altiplano, instalado el 23 de noviembre de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas.

Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda; en casi la totalidad de la superficie rige el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del estado de Zacatecas, que comprende la cuenca media del río Aguanaval y otros”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 16 de mayo de 1960.

En el extremo sur rige el “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 DOF el 5 de agosto de 1988. Ambas vedas son de tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la porción norte está en vigor el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de los municipios de Fresnillo y Villa de Cos, Zac., y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en esos municipios”, publicado en el DOF el 6 de abril de 1981. Finalmente, una pequeña área de su extremo oriental queda ubicada en la zona de veda establecida mediante el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la parte que corresponde al área no vedada de los municipios Pánuco y Guadalupe del estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en el área que se menciona”, publicado en el DOF el 22 de octubre de 1984. Estas dos vedas son de tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego; los usuarios se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Calera, A.C., instalado el 24 de noviembre de 2000.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de evaluación; algunos de cobertura regional, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA LA CIUDAD DE ZACATECAS. Realizado en 1986 por Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A., para la extinta Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE).

El objetivo del estudio fue definir áreas favorables para la perforación de pozos para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Zacatecas, se analiza el comportamiento geohidrológico regional de los acuíferos cercanos a la capital del estado, incluyendo Calera.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE ZACATECAS, ZAC. Realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1996, para la Comisión Nacional del Agua. El estudio comprendió los acuíferos Calera, Chupaderos, Benito Juárez y Guadalupe-Bañuelos. Los principales objetivos de estudio fueron definir las características geohidrológicas e hidrogeoquímicas de los acuíferos con base en el análisis hidrogeoquímico de muestras de agua e información geológica existente.

Define la dirección preferencial del flujo subterráneo, las zonas de recarga, la comunicación hidráulica con otros valles, las familias de aguas presentes en la zona y la calidad del agua subterránea. Identifica el tipo de materiales en los cuales se encuentra alojado el acuífero y las zonas que registraron los mayores abatimientos.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LAS REDES DE OBSERVACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE CALERA, SAN LUIS POTOSÍ Y TOLUCA. ACUÍFERO DE CALERA. Realizado por Ariel Consultores, S.A., en el año 1996, para la Comisión Nacional del Agua. Como todo modelo de simulación, su objetivo principal simular diferentes escenarios de extracción del acuífero, para conocer su efecto en los abatimientos y con ello proponer el más adecuado para lograr el mejor manejo del recurso.

Mediante el conocimiento de la geología del subsuelo y la geología estructural del acuífero, identifica las distintas unidades hidrogeológicas y su funcionamiento en cuanto sus parámetros hidráulicos.

El modelo concluye que en el primer periodo de estrés el almacenamiento aporta el mayor volumen de agua y éste disminuye paulatinamente hasta el octavo y último periodo. Para ese año la extracción por bombeo era de 130 hm³/año, que sólo provocaba abatimientos medios anuales de 1 m en las áreas aledañas a Fresnillo y Víctor Rosales, en donde se concentraba la extracción.

De continuar con este mismo régimen de extracción o incrementarlo, se generarían mayores conos de abatimiento que provocarían daños económicos.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: CALERA-BENITO JUÁREZ, CHUPADEROS, GUADALUPE BAÑUELOS, CUENCA DE AGUANAVAL, OJOCALIENTE Y LA BLANCA, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado en 1997 por Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua. Define la red de monitoreo piezométrico, integrada por 47 pozos y propone la perforación de 9 piezómetros localizados en las zonas en las cuales se carece de información.

De esta manera, la red propuesta quedaría integrada por 56 sitios de medición o nodos, separados entre sí a distancias que varían de 2 a 8 km. Incluye configuraciones de los niveles estáticos para los años 1980 y 1997 con las que se identificaron las zonas de recarga y descarga del acuífero, las áreas de concentración de la extracción y las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. Finalmente, con la información piezométrica de años previos, se definen las zonas en las que se presentan los mayores abatimientos.

ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO CALERA, ZAC. Realizado por Consultoría BETSCO, en 2004, para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea en la red de medición del acuífero y definir su evolución como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que estaba sujeto.

Mediante las configuraciones del nivel estático, identifica las principales zonas de recarga, las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, así como los conos de abatimiento más importantes que han distorsionado la red de flujo natural. Al sur del acuífero, en las inmediaciones de la localidad Francisco I. Madero, identifica un parteaguas subterráneo que separa el flujo que se dirige hacia Calera del que va hacia el acuífero vecino Benito Juárez.

DISTRIBUCIÓN Y MOVILIDAD DE ELEMENTOS TRAZA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA HIDROLÓGICA DE CALERA, ZACATECAS. Realizado por Eva Sarafí Villalpando Dávila en el año 2007. Tesis Profesional, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra. En este trabajo se realiza la caracterización hidrogeoquímica del acuífero que constituye la fuente para el abastecimiento agrícola, industrial y potable. Se realizaron análisis físico-químicos a 99 muestras de agua subterránea con la determinación de los elementos mayores y 26 elementos traza.

Los resultados establecieron tres tipos de agua: bicarbonatada sódica, bicarbonatada cálcica y bicarbonatada mixta. La calidad del agua subterránea se consideró en general como buena, dado la concentración de los elementos se encontró dentro de la normatividad aplicable, con excepción del arsénico que presentó valores más cercanos a los máximos permisibles cada año, y en el caso de algunos aprovechamientos muy puntuales, ubicados al norte de la zona muestreada, donde los sólidos totales disueltos, el sodio y nitratos están por encima de la norma mexicana.

GEOLOGÍA DE LAS ÁREAS FRÁGILES Y ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS AGUANAVAL, CALERA Y CHUPADEROS, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, en el año 2008, para la Gerencia Operativa del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de los Acuíferos Aguanaval, Calera y Chupaderos. Actualiza las mediciones piezométricas y elabora configuraciones del nivel estático para los años 1997 y 2007, concluyendo que no presentan cambios significativos en su posición, mostrando una dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte e identificando los principales conos de abatimiento ubicados en la zona de concentración de la extracción, el principal de ellos en toda la zona agrícola que rodea a la ciudad de Calera, en donde el ritmo anual de abatimiento variaba de 1.5 a 2.5 m.

La calidad del agua subterránea se consideró buena, ya que en la gran mayoría de las muestras analizadas los parámetros flúor, sodio, cloro, arsénico, nitratos y sólidos disueltos totales, se ubican en rangos de concentración dentro de los límites permisibles establecidos en la modificación a la NOM 127-SSA1-1994

DISEÑO DEL PLAN DE MANEJO INTEGRAL DEL ACUÍFERO CALERA, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., en el año 2010, para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo general fue formular un plan de integrado, para adecuar el desarrollo sustentable de la región a la disponibilidad del agua, enmarcado en el contexto de la política hidráulica nacional. Recopila información general y entre sus actividades más importantes destacan la caracterización y proyección de la demanda por uso, la proyección del volumen de agua utilizable y el balance integral del agua.

El plan de manejo definido establece opciones de manejo de la demanda y de la disponibilidad, así como acciones para las diferentes alternativas o escenarios hasta el año 2040, utilizando el modelo de simulación construido previamente.

Concluye que se necesario disminuir aproximadamente 100 hm³ anuales de extracción para estabilizar la relación recarga-extracción y propone para ello recuperar 104 hm³ a través de la tecnificación y reconversión de cultivos, el incremento de eficiencias en la distribución y uso de agua en los sectores agrícola y público-urbano, el reúso de agua tratada, la recarga de agua pluvial, así como la recarga de agua tratada.

El Plan de Manejo identifica la conveniencia de invertir un monto poco mayor de 800 MDP, que conforme se inviertan, causarán beneficios y ahorros por 8 mil MDP, los cuales constituyen el creciente costo del agua por efecto de su agotamiento. Entre sus actividades incluye además el censo de aprovechamientos e hidrometría de las extracciones.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO CALERA, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015. Se utilizó la información piezométrica reciente 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 con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la zona de conjunción de dos Provincias Fisiográficas. La mayor parte de su territorio pertenece a la Mesa Central y sólo la porción sur y suroccidental se ubica en la 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 territorio de las Provincias Fisiográficas Mesa del Centro, Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas; y Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos.

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 parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m.

En la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas dominan extensos terrenos áridos con lomeríos en la porción noreste y sierras bajas en la región sureste. En la región suroccidental existen dos llanuras aluviales de extensión considerable, pero lo que caracteriza a esta subprovincia, especialmente a su porción occidental, es la gran llanura desértica que se extiende en territorio del límite entre los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, con piso de caliche, que se localiza a una altitud promedio de 2,000 msnm.

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 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias.

Por su parte, la Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2,300 a 2,700 msnm, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son de pendientes suaves, con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos.

El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago.

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 mayor superficie del acuífero prevalece el clima semiseco templado $B_{s1}kw$. clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (i), 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 se precipita 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.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 29 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: El Sauz, San José de Llanetes, Presa El Cazadero, Nieves, Río Grande, Saín Alto, Cañitas, Rancho Grande, El Saladillo, Ojocaliente, Villa de Cos, Palmillas, Trancoso, Tierra y Libertad, San Antonio del Ciprés, Saucedá de la Borda, Guadalupe, La Bufa, Chichimequillas, Zacatecas, Llano Blanco, Calera, Escuela de Agronomía, El Peñasco, Fresnillo, Presa Boca del Tesorero, Gral. Joaquín Amaro, Presa Santa Rosa y Jesús María.

Con los registros obtenidos para el periodo 1980 a 2009, y utilizando el método de isoyetas e isotermas, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **425 mm, 16.3 °C y 2,263 mm**, respectivamente.

La temporada de lluvias es en general de junio a septiembre, con lluvias aisladas en invierno y estiaje de octubre a junio, el periodo de mayor calor se registra de mayo a agosto y enero es el mes más frío. Mayo es el mes de mayor índice de evaporación media y diciembre el de menor.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 37 El Salado, cuenca Fresnillo-Yescas, subcuenca Fresnillo. Una pequeña superficie de su extremo occidental se ubica en la Región Hidrológica No. 36 Nazas-Aguanaval. Corresponde a una cuenca cerrada de forma irregular, ligeramente alargada, con orientación norte-sur; delimitada en general por el parteaguas que forma la Sierra de Zacatecas en su porción oriental, y la Sierra de Fresnillo y algunos cerros y lomeríos de poca elevación en su región occidental.

En el área no existen corrientes superficiales importantes, únicamente pequeños arroyos de régimen intermitente; entre los que destaca el arroyo "La Joya", originado por la confluencia de los arroyos El Bote, Rancho Nuevo y El Molino; el arroyo Calera, formado por los arroyos Carrizalillo y Hornitos; el arroyo de Enmedio y el arroyo Plateros. Todos ellos escurren a las lagunas Santa Ana y Sedano.

El drenaje es dendrítico y concéntrico hacia el centro de la cuenca, para continuar con dirección norte, hacia las lagunas Santa Ana y Sedano, que son los cuerpos de agua de mayor importancia.

Existen pocos aprovechamientos de agua superficial, de reducida capacidad, pero de gran importancia para la zona, entre los que destacan las presas Arroyo de En medio, Bordo Toribio, Calera, la Bomba, Los Chilitos y El Peñasco, que en total suman una capacidad de almacenamiento de 13.2 hm³ anuales, para el beneficio de 1,649 hectáreas de cultivo.

3.4 Geomorfología

En el área se identifican cuatro unidades geomorfológicas, las cuales se agrupan en: valles, lomeríos, y sierras.

La primera unidad geomorfológica cubre la mayor parte de la superficie del acuífero; se trata de un valle asimétrico de forma alargada, con una orientación norte-sur, con un ligero cambio de dirección hacia el NW; de pendiente ligera, que se encuentra a una altitud comprendida entre los 2,200 y 2,050 msnm.

Está constituido por material granular de textura variable, depositado en forma irregular, por lo que en algunas zonas el material se presenta más arenoso, como producto de la erosión de las zonas altas que lo delimitan.

Los principales sistemas de topofomas que delimitan el valle, al norte, este y oeste son los lomeríos con bajadas; en tanto que al sur se distinguen bajadas aluviales con lomeríos, y al sureste los rasgos corresponden a sierras bajas y lomeríos. Los principales sistemas montañosos son la Sierra de Fresnillo, localizada en la región occidental del área, que está constituida por rocas riolíticas, la cual presenta elevaciones máximas de 2,850 msnm; y la Sierra de Zacatecas, ubicada al oriente, constituida por rocas volcánicas y metasedimentarias con elevaciones máximas del orden de 2,700 msnm. El drenaje en general es de tipo dendrítico; por sus características, la región se ubica en una etapa geomorfológica de madurez temprana.

4 GEOLOGÍA

El marco geológico regional de la zona en la que se ubica el acuífero está representado por los eventos relacionados con el establecimiento de la Sierra Madre Occidental y la evolución del Terreno Guerrero, que fue definido por Campa et al. (1983), los cuales presentan características litoestratigráficas diferentes.

De esta manera, del Terreno Guerrero se presentan unidades metamorfizadas de edad Cretácico, y unidades de origen volcánico del Terciario pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Completan la columna unidades de edad cuaternaria que consisten en basaltos y materiales aluviales.

La secuencia estratigráfica está conformada por unidades afines del Terreno Guerrero, y una cubierta de rocas ígneas de composición ácida y básica; las rocas cristalinas identificadas sólo afectan a las unidades del Terreno Guerrero. La unidad más antigua corresponde a una secuencia de rocas metasedimentarias de la Formación Zacatecas, expuestas en la porción suroriental, constituida en la zona por metacaliza en estratos delgados a laminares, cuya edad basada principalmente en fauna de cefalópodos, que se asigna al Triásico Superior (Cárnico).

Su base no se observa y se infiere que está cubierta, discordantemente, por la Formación Chilitos constituida por una secuencia vulcanosedimentaria conformada en la base por lavas andesíticas, en ocasiones con alternancia de areniscas-limolitas, con escasas lutitas hacia la cima, cuya edad por su contenido faunístico, es del Jurásico Superior al Cretácico Inferior; su distribución está restringida a la porción suroriental y central, en donde sus relaciones son discordantes con las rocas volcánicas y sedimentos continentales del Terciario.

Al igual que la Formación Zacatecas, se encuentra afectada por una apófisis de composición diorítica, ubicada en la región suroriental, cuya edad tentativa es Eoceno.

El contacto entre la secuencia anterior y las rocas sedimentarias que a continuación se describen, se encuentra cubierto, aunque se supone que es tectónico. Las rocas sedimentarias de la Formación Cuesta del Cura consisten de una secuencia calcáreo-pelítica y su edad abarca del Albiano al Cenomaniano. Sobreyaciendo de manera concordante aflora la Formación Indidura, constituida por una secuencia pelítica-calcárea cuya edad corresponde al Cenomaniano-Turoniano; ambas unidades se encuentran en contacto tectónico con la Formación Caracol de edad Coniaciano-Maastrichtiano.

La actividad ígnea continúa con la emisión de riolitas, tobas riolíticas y horizontes de ignimbritas, que están ampliamente distribuidas en una franja orientada en dirección NW-SE en la porción occidental del acuífero. Sus afloramientos constituyen un alto topográfico que separa a las fosas Calera y Tlaltenango, ubicadas al oriente y suroriente. La edad de dichas rocas ácidas es Oligoceno-Mioceno. De la misma edad le siguen flujos riolíticos que se distribuyen irregularmente con orientación NW-SE y coronan a la unidad de ignimbritas-riolitas.

Durante el Oligoceno medio a tardío se presenta una serie de cambios en el ángulo de incidencia entre las placas Farallón y de Norteamérica, originando un arco magmático continental, que produjo el edificio de la Sierra Madre Occidental, representado en la zona por tobas riolíticas con algunas intercalaciones de basalto. Afectando a las rocas antes descritas se presentan domos de composición riolítica.

El emplazamiento del pórfido riolítico, de probable edad Oligoceno-Mioceno afectó parcialmente a rocas de la Formación Chilitos y a las riolitas del Terciario. Una vez cerrado el ciclo de actividad volcánica, se dieron las condiciones propicias para el depósito de sedimentos clásticos continentales ampliamente distribuidos principalmente a suroeste y noreste del acuífero, depositados en grandes bloques fallados e inclinados (fosas Zaragoza y Fresnillo).

Durante el Cenozoico, el desarrollo de fallas normales al norte del Eje Neovolcánico, ha sido relacionado con la reactivación en el Pleistoceno, de muchas fallas antiguas.

El fallamiento causó inclinación moderada de bloques y en muchas áreas estuvo asociado con la erupción de basaltos alcalinos.

Esta unidad está conformada por conglomerados polimícticos constituidos por clastos de rocas volcánicas con esporádicos fragmentos de caliza y arenisca, que constituyen la Formación Santa Inés que por sus relaciones estratigráficas se ubica en el Mioceno-Plioceno.

En general cubre discordantemente a todas las unidades que le anteceden. La última fase ígnea tiene lugar en el Cuaternario Pleistoceno cuando se emiten coladas de basaltos fisurales cuyos afloramientos se ubican al norte y poniente, los cuales casi siempre descansan discordantemente sobre los conglomerados, relación que permite asignarles la edad mencionada,

Finalmente, localizados a suroeste y norte existen depósitos aluviales y coluviales conformados por limos y arcillas del Holoceno (Cartas Geológico-Mineras F13-B47 Fresnillo y F13-B57 Víctor Rosales. Escala 1:50,000, SGM, 2006 y 2011, respectivamente) (figura 2).

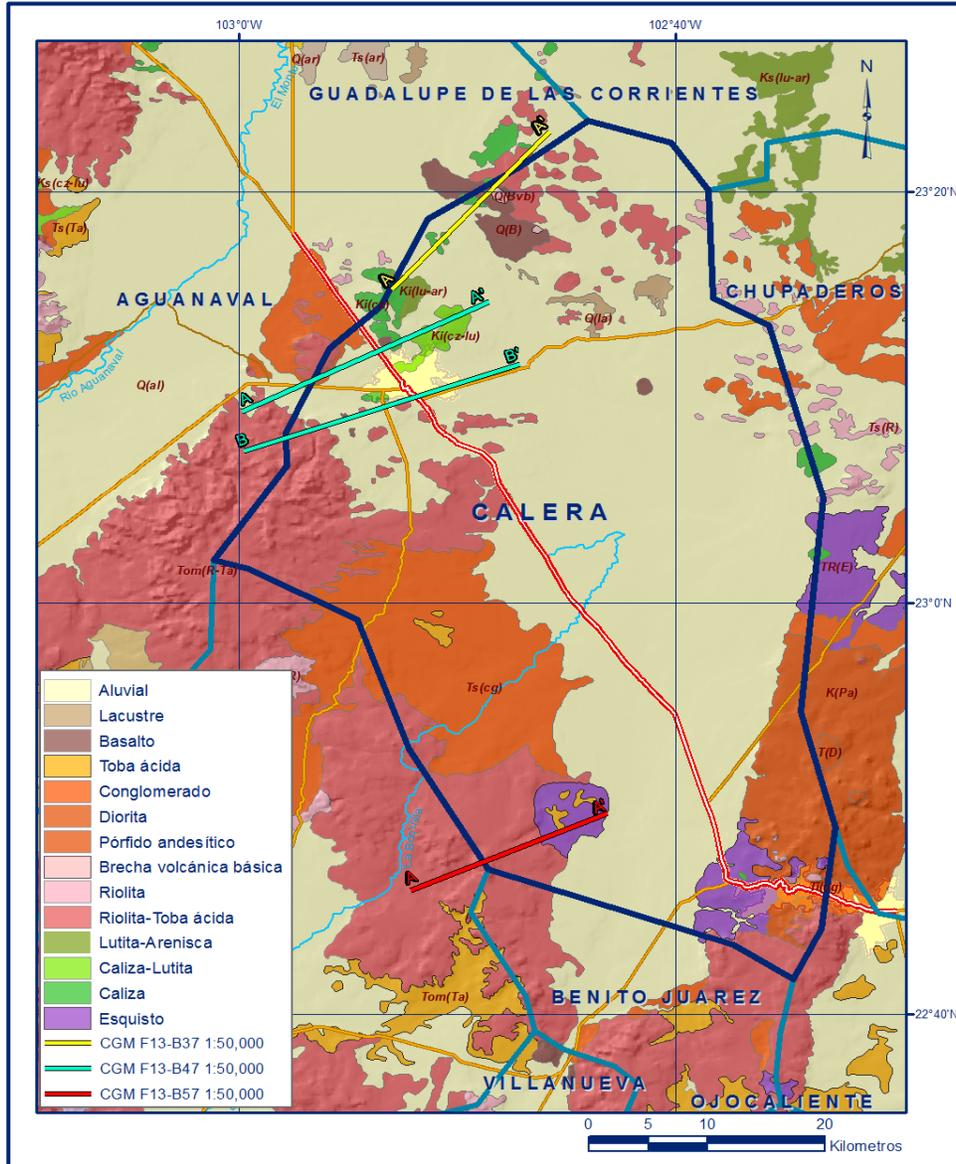


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Debido a la existencia de los elementos tectonoestratigráficos definidos anteriormente, la estratigrafía del área presenta diferencias notables en conformación. Por esta razón la descripción de las unidades se realiza de manera separada por elemento.

TERRENO GUERRERO

JURÁSICO-CRETÁCICO INFERIOR

Formación Chilitos

Término informal propuesto por De Cserna (1972) para denominar a una secuencia vulcanosedimentaria conformada por lavas masivas y almohadilladas de composición basáltica-andesítica, con intercalaciones de rocas sedimentarias, vulcanoclásticas y calcáreas, metamorfizadas en facies de esquistos verdes, que cabalgan a la Formación Zacatecas, cuya edad tentativamente se le asignó al Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Esta unidad es la principal receptora de los yacimientos de oro, plata y polimetálicos. Los principales afloramientos de esta unidad se ubican en la porción sureste del área, conformando la sierra ubicada al este del poblado Casa Blanca y el frente norte de los cerros El Águila y El Potosí, así como en las lomas localizadas al oriente del poblado Zoquite, y finalmente en la porción oriental de la sierra de Zacatecas. Las andesitas presentan un color verde, estructura masiva y textura porfídica. Intercalada con las rocas metavolcánicas.

Se observan filitas de color verde, ligeramente silicificadas, con alto grado de alteración por intemperismo que ocasionan una coloración parda rojiza del suelo. Por la deformación en forma de cabalgaduras no es posible determinar su espesor. Se encuentra cubriendo a las rocas de la Formación Zacatecas por medio de un contacto tectónico, y subyaciendo concordantemente a las rocas calcáreas del Cretácico Inferior. Estas rocas se encuentran interdigitadas con una secuencia de areniscas y calizas que corresponden a la **Formación Valdecañas**, que afloran al norte del acuífero.

Ambas formaciones presentan intensa deformación y un metamorfismo regional incipiente, cuya edad tiene un alcance del Tithoniano al Berriasiano. De acuerdo con el SGM (1991), la edad de estas formaciones ha sido determinada con base en su contenido faunístico, consistente en amonitas colectadas en el arroyo Chilitos y radiolarios colectados en Pánfilo Natera, y se le ha asignado una edad del Cretácico Inferior, correlacionada con la Formación Taraises del Terreno Sierra Madre.

TERRENO SIERRA MADRE (CUENCA MESOZOICA DEL CENTRO DE MÉXICO)

TRIÁSICO SUPERIOR

Formación Zacatecas

Nombre con el que Carrillo Bravo (1971) se refirió a una secuencia de filitas y metalutitas sericitizadas con nódulos de cuarzo, meta-areniscas, metatobas, metaconglomerados y metacalizas, interestratificadas con filitas, sobre las cuales sobreyacen transicionalmente metalavas de composición andesítico-basáltica; todas ellas con metamorfismo de facies de esquistos verdes, que afloran al noroeste y sureste de la ciudad de Zacatecas.

Con base en los restos fósiles Burckhardt y Scalia (1906), la dataron en el Triásico Superior. Dentro del área de estudio se encuentran distribuidas principalmente al norte y noroeste del poblado Guadalupe.

Litológicamente está constituida por intercalaciones de estratos delgados de filitas, pizarras, capas gruesas y medias de cuarcitas y calizas. Las filitas son de color gris verdoso, con algunas tonalidades ocasionadas por el contenido de hematita diseminada; en lo que respecta a las pizarras, en ocasiones se encuentran silicificadas, son de color verde y se encuentran alternando con horizontes arcillosos. Las cuarcitas son de color gris rosáceo amarillento, muy compactas; las calizas se presentan en forma de cuerpos lenticulares, de color gris y se encuentran recristalizadas.

En las cuarcitas y filitas se llegan a presentar lentes de cuarzo lechoso, seguramente producto de los procesos hidrotermales. En los trabajos consultados no se tiene reportado el espesor de la unidad, por lo que se asume que su potencia corresponde con los 1,000 m que le asignó Mc Ghee en 1977.

La base de la unidad no se observa, en tanto que su contacto superior con la Formación Chilitos es tectónico (Centeno, 1997). La edad estimada para esta formación es del Triásico Superior. Su depósito se considera que ocurrió en un ambiente marino marginal.

CRETÁCICO INFERIOR

Grupo Proaño

Nombre propuesto informalmente por De Cserna en 1976, para designar un paquete de sedimentos de origen marino, localizados en las inmediaciones de la ciudad de Fresnillo, Zac.

En la zona en la que se localiza el estudio sólo se encuentra en las inmediaciones de las localidades de Plateros y Fresnillo. López R. (1985) menciona que el Grupo Proaño se compone de tres miembros constituidos de la base a la cima por 600 m basales de grauvacas y lutitas arcillosas; la parte media consta de 180 m de espesor de lutitas carbonosas y calcáreas; en tanto que el miembro superior lo componen 300 m de grauvacas, lutitas y calizas.

La cartografía elaborada por el SGM (1998), presenta a esta unidad en contacto tectónico con la Formación Chilitos, la cual le sobreyace a través de una falla de cabalgadura, en tanto que al norte de Fresnillo, la relación que guarda con la unidad superior correspondiente con las calizas de la Formación. Papantón no se encuentra definida, sin embargo, de acuerdo a su posición estratigráfica se considera que es de carácter concordante.

Formación Papantón

Término propuesto informalmente por Cuevas (1980), para designar al conjunto litológico compuesto, de manera general, por una secuencia de calizas de estratificación delgada, media, gruesa y en ocasiones masivas, que en algunos intervalos estratigráficos presentan horizontes de areniscas.

Este conjunto estratigráfico presenta sus mejores exposiciones en la porción noreste de la ciudad de Fresnillo; afloramientos más restringidos se observan al sur de la sierra Chapultepec e inmediaciones del poblado de Sombrerete.

La Formación Papantón se encuentra constituida por tres miembros: el basal consta de intercalaciones de calizas de capas delgadas (10-15 cm de espesor), con lutitas y areniscas de estratificación laminar y delgada (menor de 20 cm); las calizas son de color gris con lentes y bandas de pedernal negro, los sedimentos arcillosos forman paquetes hasta de 10 cm de espesor y muestran un color gris oscuro; las areniscas son de capas delgadas (20 cm) y de color ocre amarillento.

La parte media de la unidad consta de calizas de estratificación delgada a masiva (10 cm a 2 m), de color gris que intemperiza a color rosa y rojizo; con esporádicas interestratificaciones de paquetes de 10 a 20 cm de espesor de lutitas que presentan estructura laminar y algunos nódulos de pedernal.

El miembro superior está compuesto por calizas de estratificación delgada a masiva, de color gris claro y rojizo; presentan nódulos y lentes de pedernal, que se intercalan con estratos laminares y delgados de areniscas y lutitas.

En general la unidad se encuentra afectada por un fuerte plegamiento e intrusión, lo cual impide la observación plena de sus características litológicas así como su espesor, sin embargo, CONAGUA (1992), estima que sobrepasa los 500 m.

Las relaciones estratigráficas de la Formación Papantón deben ser concordantes con la unidad inferior, representada por el Grupo Proaño.

Subyace concordantemente a la Formación Indidura. Cuevas (op. cit.), en la localidad tipo de la unidad, reporta la presencia de *Turrilites schencheerianus*, *Crinóceras s.p.*, *Calciesferula imnominata*, *Pithonella ovalis*, *Pithonella trejoi* y *Rotalipora s.p.*, fósiles que le asignan un rango de edad Albiano-Cenomaniano, correlacionable con la Formación Cuesta del Cura.

Es importante hacer mención que la posición paleogeográfica de la zona de estudio, se ubica en la transición de facies entre la cuenca post-arco al sureste y la cuenca del Centro de México al noreste (Pacheco y otros, 1988), por lo que la Formación Taraises puede estar representada en el occidente del sector cartografiado por la parte superior de la Formación Chilitos.

Formación Cuesta del Cura.

Fue definida por Imlay (1936) en el sector denominado Cuesta del Cura, en la Sierra de Parras, al sur de Coahuila. La secuencia descrita originalmente son estratos delgados de caliza con arcillas intercaladas y bandas de pedernal. Dentro del área del acuífero se encuentra en los flancos de los anticlinales y está constituida por una caliza laminar de color gris oscuro con estratificación ondulada y numerosas lentes y nódulos de pedernal negro.

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.

En el área sobreyace concordantemente a la Formación Cupido, y su contacto superior es también concordante con la Formación Indidura. 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

Unidad definida por Imlay en 1938, en los afloramientos localizados en la porción central de la Sierra de Parras, Coah.

En la zona sus afloramientos son restringidos y consisten de una secuencia de intercalaciones de calizas arcillosas y lutitas calcáreas de estratificación laminar a delgada hacia la cima, además se intercalan calizas dispuestas en capas delgadas a gruesas, el color de las rocas varía de gris a gris oscuro e intemperiza en gris claro pardusco, en ocasiones verdoso. Generalmente esta unidad se presenta con abundantes pliegues debido a su naturaleza plástica, es de fácil erosión y las lutitas son muy físis.

En la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa.

Su espesor total promedio es de 200 m. Sobreyace a la Formación Cuesta del Cura; de manera local descansa de manera concordante y transicional sobre la Formación Papantón, y subyace a 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

Unidad formacional definida por Imlay en 1937, en afloramientos expuestos en el Arroyo el Caracol, ubicado en la porción central de la Sierra de Parras, Coahuila.

Se distribuye ampliamente en el sector nororiental del área estudiada, teniendo sus mejores exposiciones al poniente del poblado de Cañitas de Felipe Pescador, en tanto que sus afloramientos más restringidos se encuentran expuestos al noroeste del acuífero en donde conforman lomeríos y porciones planas, que por la baja resistencia a la erosión frecuentemente se presentan cubiertos por materiales recientes.

La Formación Caracol consta de areniscas líticas (grauvacas), con granos finos y medios con grado de redondez que varía de anguloso a subangulosos, dispuestas en capas de espesor delgado y medio, entre las que se intercalan lutitas calcáreas y calizas arcillosas, estas últimas de estructura lenticular.

Los colores de la roca son gris oscuro y negro que por intemperismo cambia a gris claro verdoso y amarillo ocre.

Sobreyace de manera transicional y concordante a la Formación Indidura, en tanto que su cima no se ha estimado, aunque generalmente se encuentra cubierta por depósitos continentales del Terciario y Cuaternario o por derrames volcánicos terciarios.

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 y Parras del Noreste de México y con la Formación Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Por su posición estratigráfica y contenido fósil, se le asigna una edad Coniaciano-Maastrichtiano.

TERCIARIO

Conglomerado Rojo Zacatecas

Ponce y Clark (1988), asignan con este nombre a un depósito fluvial conglomerático de matriz rojiza, de origen poligenético.

Los principales afloramientos se presentan al sureste de la sierra de Zacatecas, en las inmediaciones del poblado La Zacatecana y la laguna El Pedernalillo y entre las ciudades de Zacatecas y Guadalupe. Se encuentra constituido principalmente por guijas y cantos de esquistos, filitas, andesitas y basaltos, cantidades subordinadas de rocas riolíticas y fragmentos de rocas graníticas, areniscas, calizas y pedernal, con cementante arcillo-calcáreo que en conjunto presentan un color púrpura a naranja, debido a su contenido de hierro.

Su contacto inferior es discordante con la secuencia vulcanosedimentaria del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. La edad que se le asigna es Paleoceno-Eoceno, basado principalmente en las relaciones estratigráficas y en edades isotópicas.

TERRENO SIERRA MADRE

Ignimbritas y riolitas

Con este nombre se identifica a un grupo de flujos piroclásticos soldados (ignimbritas), asociados con flujos de lava riolítica que se encuentran aflorando en el extremo sur del acuífero, en las inmediaciones del poblado Trancoso, y un pequeño afloramiento en la porción norte, en las inmediaciones de Chupaderos. Las ignimbritas presentan color gris o pardo con un aspecto masivo, frecuentemente con oquedades o vesículas producidas por la alteración de los feldespatos, además de un incipiente bandeamiento; en una matriz afanítica, aunque es posible observar fragmentos de pómez aplanados.

Están emplazadas en forma de cuerpos tabulares de unos cuantos metros de espesor, que conforman mesetas de escasa altura con un fracturamiento vertical intenso que da lugar a los típicos escarpes de ignimbritas.; estas rocas son las que se encuentran conformando la unidad geomorfológica de las mesetas, localizadas en las inmediaciones de Trancoso.

En lo que respecta a los flujos de lavas, se caracterizan por presentar estructura fluidal, en ocasiones en forma de bandas muy finas, de color rosa grisáceo o rosa pardusco, con pequeñas vesículas producidas por el escape de gases; con matriz afanítica que contiene abundantes fenocristales de cuarzo y en menor proporción plagioclasas.

De manera general, estas rocas son muy compactas y resistentes a la erosión, presentan baja permeabilidad y porosidad, y exhiben un bajo grado de fracturamiento. Su espesor estimado es de aproximadamente 100 m, los más potentes se observan en las áreas donde se presentan los derrames de riolitas asociadas a las estructuras dómicas. Esta unidad sobreyace en discordancia petrológica al Conglomerado Rojo Zacatecas. El emplazamiento de estos materiales volcánicos se asocia a la emisión de flujos piroclásticos y flujos de lava que ocurrieron en el Oligoceno, que forman parte de la secuencia volcánica de la Sierra Madre Occidental. El SGM (1997) le asigna una edad del Oligoceno-Mioceno.

Tobas Riolíticas

Este término se ha utiliza para describir a un paquete de flujos piroclásticos que descansan sobre la unidad de ignimbritas-riolitas, que afloran principalmente al sur del poblado Guadalupe.

Está conformada principalmente por flujos piroclásticos que forman horizontes de estructura masiva, hasta de 6 m de espesor, de color crema amarillento y en ocasiones parduzco; textura arenosa, aunque comúnmente se observan fragmentos líticos de hasta 15 cm de diámetro, en una matriz de arenas finas integrada por fragmentos de pómez, cuarzo, vidrio y líticos.

De manera general, estas rocas se encuentran compactas y son moderadamente resistentes a la erosión. Frecuentemente presentan fracturas, algunas de ellas se encuentran rellenas por material piroclástico más fino a manera de “diques”; también se caracterizan por presentar lapillis acorazados y armados, con una estructura granular y de concreciones sobre la superficie de la roca. Con base en su posición estructural, en la porción suroccidental del acuífero Chupaderos se estimó un espesor de 300 m. Su asociación con el resto de las unidades volcánicas de la región, correspondientes con el vulcanismo de la Sierra Madre Occidental, ha permitido considerar una edad para estas rocas del Oligoceno Superior al Mioceno Superior.

Pórfido riolítico y Pórfido andesítico

Contemporánea a la actividad que dio origen a la secuencia de riolitas e ignimbritas, tuvieron lugar las intrusiones hipabisales ácidas e intermedias que afectaron a la secuencia e influyeron en los procesos mineralizantes de la región (SGM, 1997).

Por otro lado, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1996), menciona que en el Cerro la Bufa, localizado al norte de la Ciudad de Zacatecas, se encuentra un domo riolítico de textura fluidal, el cual está expuesto en una distancia vertical de 40 m, y visto en planta abarca una superficie de 1150 x 100 m, en tanto que en el Cerro el Águila, localizado en el extremo suroriental del área, existen buenos afloramientos de estas rocas.

En lo que respecta al pórfido andesítico, su distribución dentro del área del acuífero está restringida a un pequeño afloramiento localizado al este del poblado Hacienda Nueva, ubicado al noroeste de la Ciudad de Zacatecas.

De acuerdo con la descripción de Pérez-Martínez et al. (1961), su emplazamiento inició como un dique paralelo con la Veta Cantera. Por su correlación con la secuencia de riolitas e ignimbritas, el SGM (1997) le asigna una edad que varía entre los 23 y 34 ma, ubicándolos en el Oligoceno-Mioceno.

Conglomerado Polimítico

Formación Santa Inés

El término formacional de esta unidad fue propuesto por Pantoja (1963) para designar a las rocas conglomeráticas de origen continental que afloran en las cercanías de San Pedro El Gallo, Durango.

En la región se encuentran distribuidas en la mayor parte de las sierras formadas por rocas volcánicas terciarias (series volcánicas inferior y superior). Está constituida por conglomerados de rocas volcánicas, que en su contacto con las rocas subyacentes presenta capas arenosas de color rojizo, así como limos de color blanquecino, secuencia que paulatinamente cambia a conglomerados hacia la cima.

Los constituyentes del conglomerado presentan fragmentos cuya granulometría varía desde arenas hasta bloques de 50 cm de diámetro, el grado de redondez varía de redondeado a subredondeado, generalmente con escaso cementante, aunque en algunas localidades puede estar bien cementado; generalmente presenta matriz arenosa y la compactación varía con la profundidad del material, por lo que en superficie se presenta con baja compactación.

El espesor de la unidad es muy variable y depende de su distribución geográfica; los espesores mínimos se encuentran en las bases de las sierras, en tanto que en las porciones más bajas del valle su espesor rebasa los 300 m. De acuerdo con su génesis y características litoestratigráficas, se considera de edad Plioceno-Pleistoceno, aunque si se considera que los basaltos interestratificados son del Paleógeno, su edad puede abarcar desde el Mioceno.

Por la similitud litológica y relación estratigráfica, se correlaciona con la Formación Los Llanos, asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

CUATERNARIO

Basaltos

Las rocas de esta unidad se encuentran expuestas en el extremo norte del acuífero y de manera restringida en las inmediaciones de la ciudad de Fresnillo y sur de El Quemado. Por su constitución litológica, se les clasifica como basaltos de olivino de edad pliocuaternaria asociados con conos cineríticos que cubren a las rocas volcánicas terciarias.

Aluvión

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales que son producto de la denudación de rocas preexistentes.

Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte y en los lechos de cauces, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones estructuras de abanicos aluviales; ocupan más del 60% del territorio del acuífero.

Comprenden materiales detríticos en proceso de consolidación y están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, en una matriz calcárea; generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación.

Se encuentran distribuidos por toda el área de estudio cubriendo a las rocas más antiguas por medio de discordancias angulares y petrológicas.

Los materiales detríticos más gruesos se encuentran en las laderas de las montañas y hacia los valles disminuye la granulometría hasta convertirse en arenas y arcillas. Los sedimentos presentan variaciones en cuanto a textura, estructura, color, etc., dependiendo de la forma de depósito.

Depósitos lacustres

Depósitos continentales que se encuentran distribuidos principalmente al norte del acuífero, en las lagunas Sedano y Santa Ana, en las que se han acumulado sedimentos arcillosos finos, de color gris amarillento, así como depósitos de limos, que rellenan los valles, depresiones y zonas topográficamente más bajas.

4.2 Geología estructural

Los principales rasgos estructurales son del Cenozoico y están relacionados con la formación de una caldera y con una fase tectónica distensiva que originó sierras y valles en esta región.

El centro volcánico desarrollado en Zacatecas corresponde a una caldera cuyos principales rasgos estructurales que se distinguen son un sistema concéntrico y radial de fracturas, dos episodios de colapso isométrico y tres episodios de levantamiento. Las sierras de Zacatecas y Fresnillo, en su conjunto, son la expresión fisiográfica de pilares tectónicos; y los valles adyacentes corresponden a fosas tectónicas originadas por una fase distensiva ocurrida a finales del Terciario y principios del Cuaternario, cuyas fallas normales presentan una orientación general Norte-Sur, y posteriormente, rellenas por depósitos aluviales intercalados con material tobáceo.

La deformación dúctil se aprecia como una incipiente foliación con vergencia al NE en las rocas metasedimentarias y vulcanosedimentarias; la aloctonía y la deformación a las que fueron expuestas las formaciones Zacatecas y Chilitos, no facilita la adecuada interpretación de pliegues, los cuales son generalmente estructuras de cortas dimensiones y en parte afectadas por cabalgaduras que no se pueden cartografiar a la escala de trabajo.

Con la interpretación del modelo digital del terreno y su posterior verificación en campo, se definieron, dentro del dominio frágil, parte de 3 bloques orientados NW-SE a N-S, limitados por fallas normales. Los bloques conforman el pilar Sierra Fría, ubicado en el sector septentrional y nor-oeste, la fosa Calera ubicada en el sector oriente y la fosa Tlaltenango, ubicada en el sector sur-poniente.

La tectónica del Triásico Superior se caracteriza por una transgresión marina que originó el depósito de una secuencia metasedimentaria turbidítica siliciclástica de tipo flysh, representada por la Formación Zacatecas, la cual se depositó en un ambiente de abanico submarino, en ambiente de cuenca post-arco, que hacia el oriente se conoce como la Cuenca Mesozoica del Centro de México.

En el Jurásico Inferior y Medio no hay reportes de la presencia de rocas marinas.

Durante el Jurásico Medio-Jurásico Tardío, inicia una nueva subsidencia de la cuenca que da lugar a una transgresión generalizada, lo que originó una serie de fosas que fueron rellenadas por sedimentación de tipo calcáreo-arcilloso sobre un paleo-relieve irregular y en un ambiente de aguas someras. Para el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, el mar se profundiza y favorece el depósito de una secuencia vulcanosedimentaria representada por la Formación Chilitos.

Después de estos eventos ocurre magmatismo plutónico y se emplazan cuerpos intrusivos que se manifiestan como apófisis y diques dioríticos del Eoceno.

Para el Eoceno-Oligoceno-Mioceno, se interpreta que creció la intensidad del ángulo de la placa del Pacífico, y por lo tanto retrocede el arco magmático continental hacia el poniente, fenómeno que provocó que la corteza continental fuera fragmentada, ocasionando la formación de una serie de fosas y pilares tectónicos cuyos límites se convirtieron en los conductos de emisiones del paquete ignimbrítico-riolítico, y de flujos riolíticos que cubrieron a las rocas deformadas preexistentes.

Las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano cubren el segmento sur del bloque de la Mesa Central, formando un extenso campo de domos y tapones riolíticos. A finales del Mioceno y el Plioceno, las fosas tectónicas se rellenaron con potentes espesores de clastos provenientes de la erosión de las rocas preexistentes, dando origen a la formación del conglomerado polimíctico. Durante el Cuaternario existen evidencias de coladas de basalto fisural y continuó el relleno de las fosas tectónicas con sedimentos clásticos de origen aluvial (Carta Geológico-Minera Víctor Rosales F13-B57, escala 1:50,000. SGM, 2011).

La secuencia vulcanosedimentaria del área está afectada por desarrollo de superficies de foliación. Existen también estructuras anticlinales recumbentes, cabalgaduras, fallas normales y de desplazamiento lateral. En la porción noroccidental del área, al oriente del cerro Xoconostle, se observa

La cabalgadura San Antonio, orientada NW-SE con vergencia al NE. Al occidente de la misma, se presenta el anticlinal Fresnillo, orientado NW-SE y vergencia al NE. En el área de Plateros se presenta la cabalgadura del mismo nombre, la cual está orientada NE-SW con vergencia al NE, representada en forma de klippe.

De acuerdo con los trabajos realizados por el SGM en 1999, se consideró adecuado trazar una zona de cabalgadura inferida (Arroyo Prieto) que marca el límite entre los terrenos Sierra Madre y Guerrero, dicha zona de cabalgadura está orientada NE-SW y vergencia al NW.

La interpretación estructural del área de Fresnillo está ligada a los procesos tectónicos que sufrieron la región occidental y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carta Geológico-Minera F13-B47 Fresnillo. Escala 1:50,000, SGM, 2006)

4.3 Geología del subsuelo

Con base en el análisis de la información de las unidades geológicas que afloran en el acuífero así como de la información proporcionada por los cortes litológicos de pozos y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada, conglomerados polimícticos y depósitos lacustres que rellenan los valles.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica existente, y por correlación con otros acuíferos vecinos que tienen el mismo, origen, evolución y constitución geológica, se puede establecer la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada, conglomerados y depósitos lacustres, cuyo espesor puede alcanzar hasta 400 m en el centro de los valles tectónicos.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de **semiconfinamiento**, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas.

Se pueden distinguir tres medios diferentes por donde circula el agua subterránea: El medio poroso con permeabilidad primaria y secundaria e intergranular y de fracturas, el medio fracturado con permeabilidad secundaria y el medio de doble porosidad con permeabilidad combinada, intergranular y de fracturas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se utilizó la información de 43 pruebas de bombeo de corta duración realizadas en estudios previos, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos varían de **5.0×10^{-4} a 5.0×10^{-3} m²/s**; si consideramos un espesor saturado promedio de 200 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **2.5×10^{-6} a 2.5×10^{-5} m/s (0.22 a 2.2 m/d)**.

Los valores más bajos se registran en las porciones oriental, occidental y sur del acuífero, incrementándose, de manera general, hacia el norte, aunque en la zona de las lagunas Sedano y Santa Ana la presencia de sedimentos arcillosos disminuye considerablemente los valores de los parámetros hidráulicos. Los valores más altos se presentan en la zona comprendida entre las comunidades Ramón López Velarde y Santa Rita.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, para fines del balance de aguas subterráneas se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.13**.

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 previos, así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años.

Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 1997-2015, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el año 2015 registró valores que variaban, de manera general, de 20 a 140 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan.

Los niveles estáticos someros, de 20 a 30 m, se presentan en la región norte del acuífero, al este de la zona comprendida entre Fresnillo y Plateros; y de 40 a 50 m al norte de Víctor Rosales; en tanto que los más profundos, de 100 a 140, se registran en la porción oriental del valle, desde Las Catarinas en el norte hasta Hacienda en el sur.

En la porción occidental los valores de profundidad al nivel del agua subterránea varían de 80 a 100 m. En ambos casos, influenciados por la topografía del terreno (figura 4).

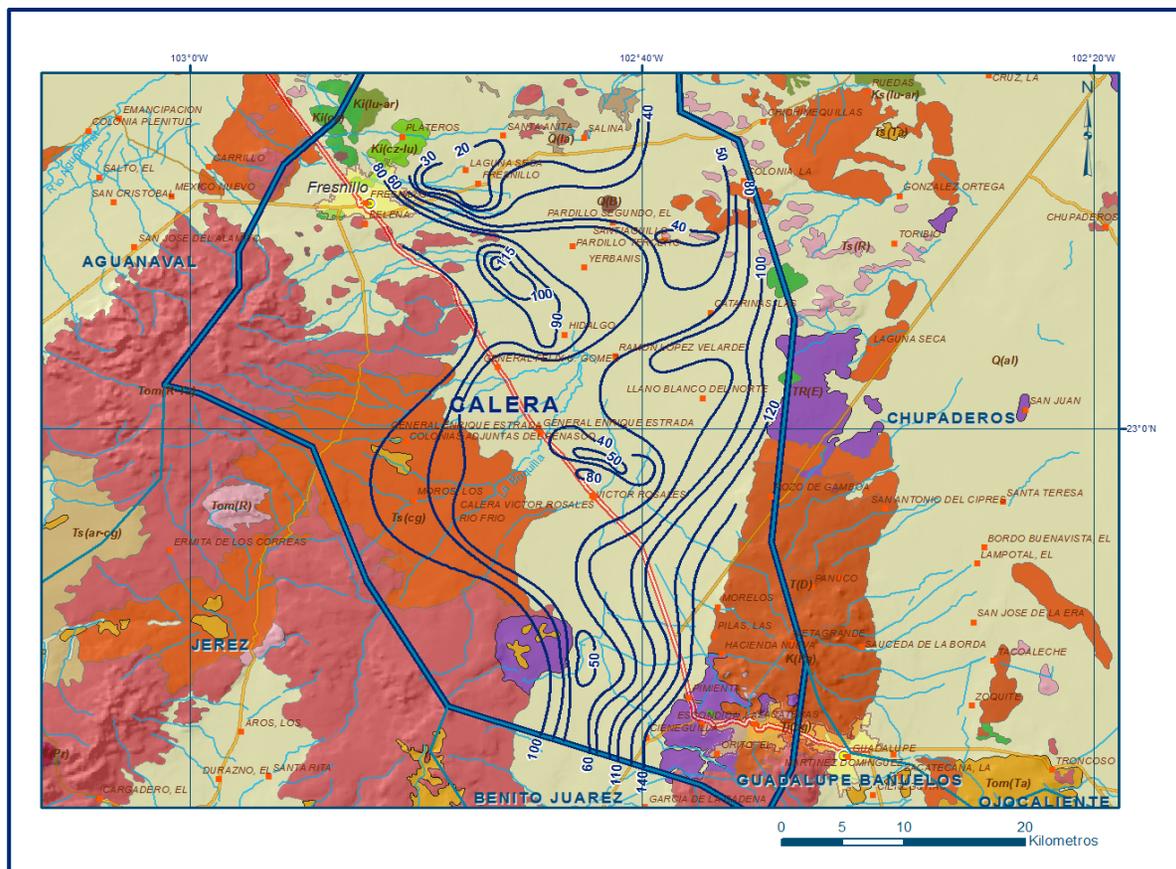


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2015 se registraron valores que variaron de 2,010 a 2,170 msnm, los cuales decrecen gradualmente desde los cuatro puntos cardinales hacia el valle aluvial localizado en la región central, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo sur a norte, con alimentaciones provenientes de los flancos norte, este y oeste, para finalmente dirigirse hacia la porción centro-norte del acuífero, donde la extracción intensiva para uso agrícola ha formado un extenso cono de abatimiento, desde General Enrique Estada, en el sur, hasta la zona ubicada al sur de las Lagunas Sedano y Santa Ana.

Las menores elevaciones, de 2010 a 2030 msnm, se registran en la porción norte, al oeste de Miguel Hidalgo, este de Ramón Lopez Velarde; en tanto que las mayores elevaciones, de 2150 a 2170 msnm, se presentaron en las inmediaciones de la comunidad Los Gringos. En esta zona ubicada en el extremo sur del acuífero, se identifica un parteaguas definido por la curva de elevación 2,170 msnm, que divide el

flujo que se dirige al centro del valle de otro que va hacia el sur, hacia el acuífero vecino Benito Juárez (figura 5).

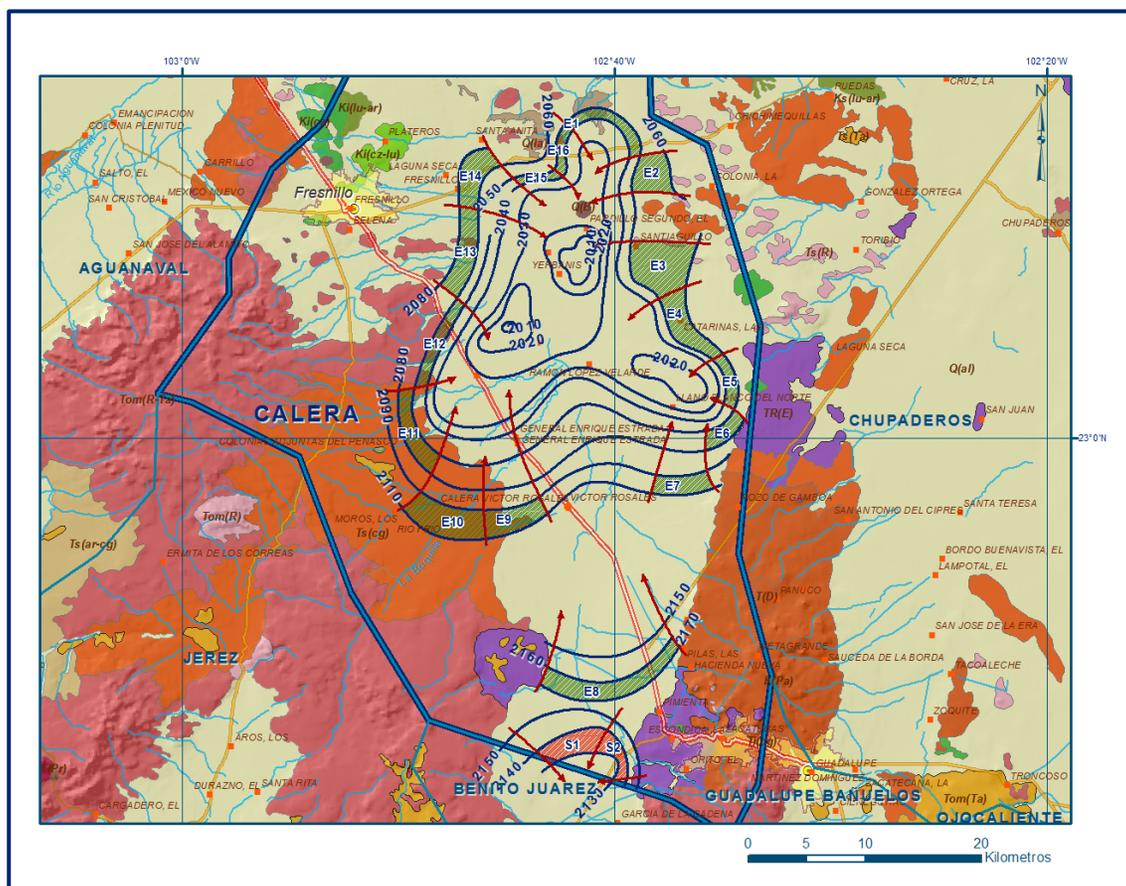


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1997-2015 registró valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie del acuífero, que varían de 2 a 30 m. Se identificaron conos de abatimiento en las zonas de concentración de la extracción para uso agrícola, ubicadas en la porción centro-norte entre Ramón López Velarde y El Yerbaniz, en la región sur que se ubica entre Morelos y el aeropuerto internacional de Zacatecas General Leobardo C. Ruíz. En estas zonas el abatimiento medio anual varía de 1.2 a 1.8 m. En la superficie restante del acuífero el abatimiento varía de 2 a 15 m, con un ritmo promedio de 0.6 m anuales (figura 6).

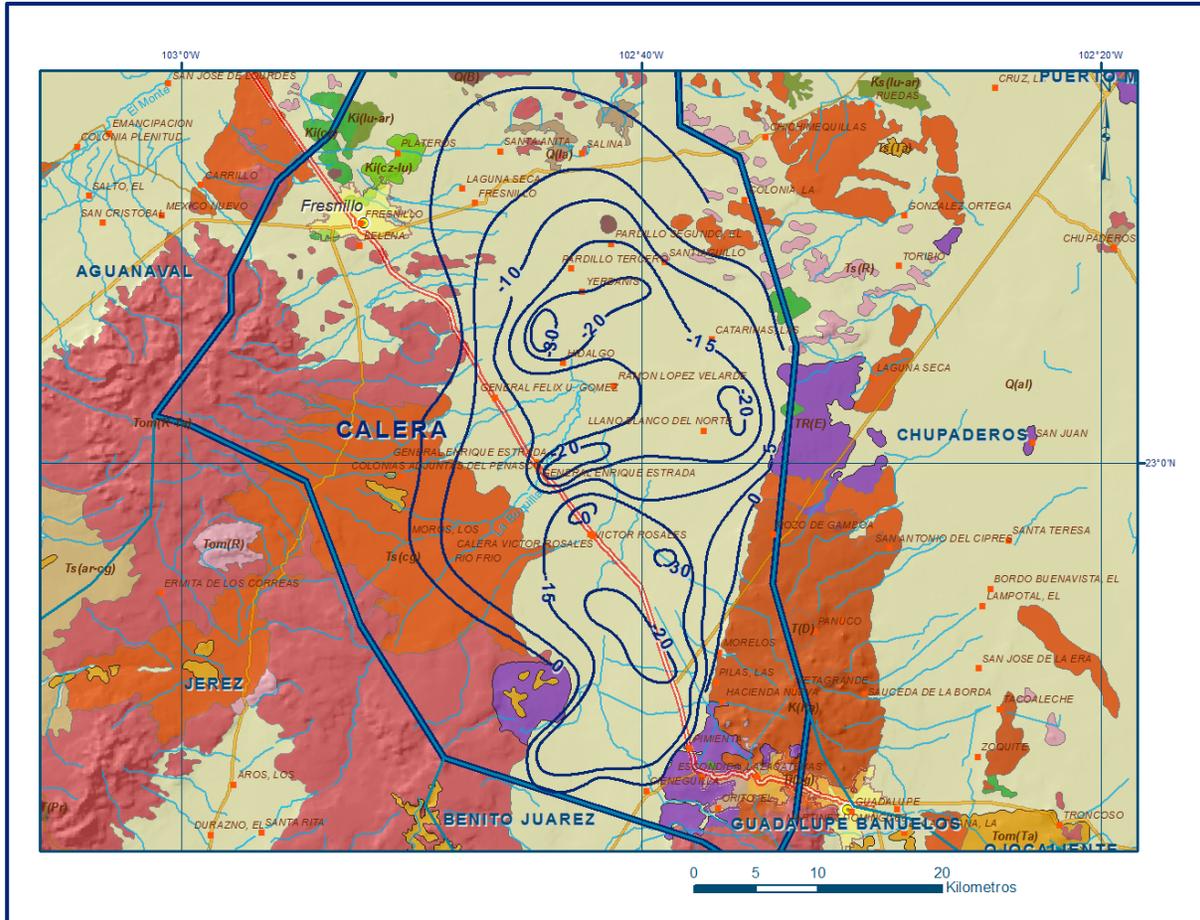


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (1997-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En la tesis profesional por la Universidad Autónoma de Zacatecas, realizada en el año 2007 (Villalpando Dávila, E.S.), se caracterizó geoquímicamente el agua subterránea del acuífero; se colectaron 99 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad así como iones principales. Se determinaron los elementos mayores y 26 elementos traza.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaban de 82 a 1898 mg/l, con valor promedio para de 410 mg/l, en cuatro muestras se reportan concentraciones por arriba de la normatividad aplicable, que superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la 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. de STD, para el agua destinada al consumo humano. Las obras que registraron esta concentración no extraen agua uso público-urbano.

De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua se clasifica, de manera general, como agua dulce, ya que la mayoría de las muestras registran valores de conductividad eléctrica inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, solo 3 muestras sobrepasan este valor; Los valores extremos varían de 110 a 2530 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción norte, en la zona de la Laguna Santa Ana, confirmando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte.

Se reporta también la existencia de concentraciones de arsénico por arriba de la norma mexicana NOM-127-SSA1-2000, con valores que varían de 0.026 a 0.06 mg/l, en los aprovechamientos ubicados 4.5 km al este de Santiaguillo, 5.2 km al noreste de Ramón López Velarde, y la concentración más alta en un pozo localizado a 5.5 km al suroeste de Félix U. Gómez.

Estos aprovechamientos no extraen agua para consumo humano. En general las concentraciones determinadas variaron de 0.0006 a 0.025 mg/l.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó la existencia de tres familias del agua: bicarbonatada-mixta, bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica, que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas y calcáreas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la totalidad de las muestras de agua se clasifican como C_2S_1 , que representan 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 más reciente llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2010, se registraron un total de 2097 obras activas que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 1,417 son pozos y 680 norias.

Del total de obras, 1379 se utilizan para uso agrícola, 453 para dotación de agua potable a las comunidades de la región, 229 para uso doméstico-abrevadero, 31 para uso industrial y 5 para otros usos.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **176.5 hm³ anuales**, de los cuales 159.2 hm³ (90.2 %) se destinan al uso agrícola, 11.1 hm³ (6.3%) para abastecimiento de agua potable, 1.1 hm³ (0.6%) para usos pecuario y doméstico y 5.1 hm³ (2.9%) para uso industrial.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1997-2015, en una superficie de **1,080 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 quedan 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 (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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 la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (R_i). Para este caso, debido a que el volumen utilizado para uso público-urbano es pequeño en comparación con el utilizado en la agricultura, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r).

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

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

Donde:

- R_v :** Recarga vertical
- E_h :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- R_r :** Recarga Incidental por retornos de riego
- B :** Bombeo
- S_h :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

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. 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 2015 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

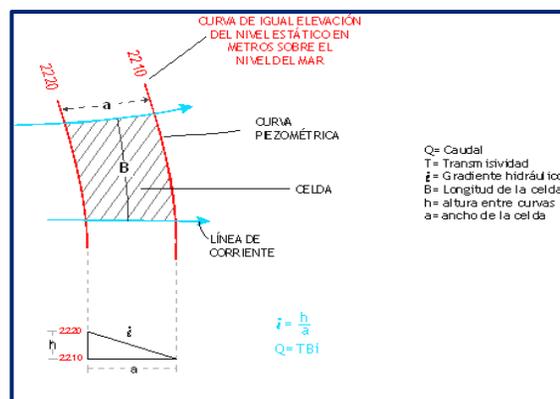
Donde:

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 **25.3 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2015)

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	6430	830	10	0.0120	0.0010	0.0775	2.4
E2	3335	1785	10	0.0056	0.0010	0.0387	0.6
E3	4285	3570	10	0.0028	0.0025	0.0300	0.9
E4	6190	2025	10	0.0049	0.0020	0.0611	1.9
E5	5000	1070	10	0.0093	0.0010	0.0467	1.5
E6	4285	1190	20	0.0168	0.0008	0.0576	1.8
E7	4760	1550	20	0.0129	0.0012	0.0737	2.3
E8	1190	1665	10	0.0060	0.0008	0.0538	1.7
E9	4760	1070	20	0.0187	0.0005	0.0445	1.4
E10	7380	1905	20	0.0105	0.0005	0.0387	1.2
E11	8095	1550	20	0.0129	0.0005	0.0522	1.6
E12	8335	1190	10	0.0084	0.0007	0.0490	1.5
E13	7140	1310	20	0.0153	0.0008	0.0872	2.8
E14	5950	1905	20	0.0105	0.0008	0.0500	1.6
E15	3570	1430	10	0.0070	0.0010	0.0250	0.8
E16	3810	950	10	0.0105	0.0010	0.0401	1.3
TOTAL							25.4

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

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 5% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental.

Tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a 40 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 159.2 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 8.0 hm³ anuales. **Rr = 8.0 hm³ anuales**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B) y de manera natural mediante flujo subterráneo (Sh) a través de un parteaguas hacia el acuífero vecino Benito Juárez.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **176.5 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 2015 (figura 5); su valor estimado es de **1.2 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo subterráneo horizontal

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	5715	2140	10	0.0047	0.0008	0.0214	0.7
S2	2975	1430	10	0.0070	0.0008	0.0166	0.5
Tota salidas							1.2

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 1997-2015 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.13, 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)

Como consecuencia de la explotación del recurso, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciado una variación negativa del almacenamiento. El volumen de agua drenado en el intervalo 1997–2015, fue de -1,559.3 hm³, que representa un promedio anual de **-86.6 hm³** (tabla 4).

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (1997-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -5	-2.5	242.6	0.13	-78.8
-5 a -10	-7.5	281.8	0.13	-274.8
-10 a -15	-12.5	168.6	0.13	-274.0
-15 a -20	-17.5	316.8	0.13	-720.7
-20	-20	34.8	0.13	-90.5
-30	-30	8.4	0.13	-32.8
-20 a -30	-25	27.0	0.13	-87.8
Área de balance		1080.0	TOTAL	-1559.3
		Promedio anual		-86.6

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:

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

$$R_v = 176.5 + 1.2 - 86.6 - 25.3 - 8.0$$

$$R_v = 57.8$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 57.8 + 25.3 + 8.0 \\ R &= 91.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **91.1 hm³/año**, de cuales 83.1 hm³ son recarga natural y 8.0 hm³ recarga incidental.

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 la descarga natural comprometida es de 1.2 hm³ anuales, que corresponden a las salidas subterráneas hacia el acuífero Benito Juárez. Por lo tanto **DNC = 1.2 hm³/año**.

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 **157,160,740 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 91.1 - 1.2 - 157.160740 \\ \text{DMA} &= -67.260740 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **67,260,740 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 1996. Estudio Geohidrológico e Hidrogeoquímico en la Zona de Zacatecas, Zacatecas. Realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Comisión Nacional del Agua, 1997. Estudio para la Reactivación de Redes de Monitoreo de los Acuíferos Valles de Calera-Benito Juárez, Chupaderos, Guadalupe Bañuelos, Cuenca del Aguanaval, Ojocaliente y La Blanca, en el estado de Zacatecas. Realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Calera, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, 2004. Actualización Piezométrica del Acuífero Calera, Zac. Realizado por Consultoría BETSCO.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Diseño del Plan de Manejo Integral del Acuífero Calera, en el estado de Zacatecas. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C.