

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO OJOCALIENTE (3212), ESTADO DE ZACATECAS

Contenido

1	GENERALIDADES	2
Ant	tecedentes	
1.1	Localización	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA	7
3.1	Provincia fisiográfica	7
3.2	Clima	8
3.3	Hidrografía	9
3.4	9	
4	GEOLOGÍA	11
4.1	Estratigrafía	13
4.2	9	
4.3	5	
5	HIDROGEOLOGÍA	
5.1	Tipo de acuífero	
5.2		
5.3		
5.4	·	
	.4.1 Profundidad al nivel estático	
	.4.2 Elevación del nivel estático	
5.	.4.3 Evolución del nivel estático	
5.5	5 1 5	
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	
7	BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA	
7.1	Entradas	
	.1.1 Recarga Vertical (Rv)	
	.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	
	.1.3 Recarga incidental (Rr)	
	Salidas	
	.2.1 Extracción por bombeo (B)	
	.2.2 Descarga por manantiales (Dm)	
	.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	
7.3	,	
8	DISPONIBILIDAD	
8.1	Recarga total media anual (R)	
8.2	9 , ,	
8.3	ξ ,	
8.4		
9	BIBLIOGRAFÍA	59

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 Ojocaliente, definido con la clave 3212 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Aguascalientes; entre los paralelos 22°17' y 22° 44' de latitud norte y entre los meridianos 102°06' y 102° 38' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1.627 km².

Limita al norte con el acuífero Chupaderos, al noreste con el acuífero La Blanca; al sureste con el acuífero Loreto; al noroeste con los acuíferos Benito Juárez y Guadalupe

Bañuelos al oeste con Villanueva y al suroeste con el acuífero Jalpa-Juchipila; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al sur con el acuífero Valle de Aguascalientes, perteneciente al estado de Aguascalientes (figura 1).

Geopolíticamente el área que cubre el acuífero comprende la totalidad de los municipios Cuauhtémoc y Luis Moya; la mayor parte de Genaro Codina y Ojocaliente; de manera parcial a los municipios de Guadalupe, Trancoso, y General Pánfilo Natera, así como pequeñas porciones de los municipios de Loreto y Villanueva.

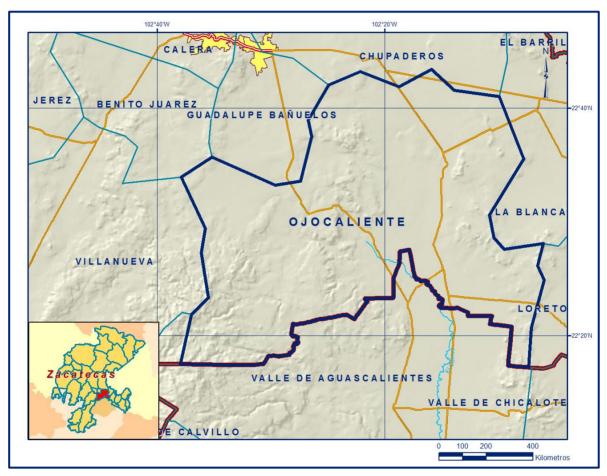


Figura 1. Localización del Acuífero

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

VERTICE	NGITUD OESTE LATITUD NORTE						OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	EGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	EGUNDOS	
1	102	35	310	22	23	20.5	
2	102	36	8.8	22	27	15.9	
3	102	35	45.9	22	29	25.1	
4	102	37	53.0	22	33	55.9	
5	102	35	12.4	22	35	40.2	
6	102	29	38.9	22	33	13.2	
7	102	27	25.6	22	33	35.1	
8	102	26	26.5	22	37	28.1	
9	102	26	45.6	22	38	54.9	
10	102	24	57.6	22	42	13	
11	102	22	114	22	43	11.7	
12	102	18	46.9	22	41	510	
13	102	15	54.7	22	43	22.9	
14	102	13	54.5	22	41	34.1	
15	102	9	58.4	22	41	12	
16	102	7	48.8	22	35	310	
17	102	10	49.2	22	30	36.3	
18	102	10	27.0	22	28	35.9	
19	102	9	33.3	22	27	34.7	
20	102	6	5.7	22	28	6.2	
21	102	6	35.4	22	26	9.5	
22	102	6	02	22	24	53.5	
23	102	7	8.7	22	20	43.4	
24	102	7	23.6	22	17	13.1	DEL 24 AL 25 POR EL LIMITE ESTATA
25	102	37	58.4	22	17	29.7	
26	102	36	58.6	22	21	53.0	
1	102	35	310	22	23	20.5	

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII "Lerma-Santiago-Pacifico", al Consejo de Cuenca "Río Santiago", instalado el 14 de julio del 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. Su territorio completo se encuentra vedado, sujeto a las disposiciones de 4 decretos de veda de agua subterránea, que se mencionan a continuación: La mayor parte de su superficie está regida por 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. Esta veda se clasifica como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En una pequeña porción de la región oriental del acuífero rige el "Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de Noria de Ángeles, Pinos, etc., ubicados en el Estado de Zacatecas", publicado en el DOF el 9 de febrero de 1978. Esta veda es de tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales. "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.

Esta veda cubre sólo una pequeña superficie de la porción noroeste del acuífero y se clasifica como tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales.

En la porción occidental está en vigor 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. Esta veda se clasifica como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 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 Interestatal Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación, A.C., instalado el 18 de abril 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 DE EVALUACIÓN Y CENSO EN LOS ESTADOS DE SAN LUIS POTOSÍ Y ZACATECAS, ZONA DE OJOCALIENTE. Realizado por Consultores S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en el año 1977. Los objetivos del estudio fueron conocer de manera preliminar el esquema general de flujo subterráneo, el tipo, calidad y distribución del agua subterránea, las condiciones de extracción y la potencialidad de los acuíferos existentes.

Los trabajos consistieron, entre otras actividades, en reconocimientos hidrogeológicos, censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, piezometría, hidrometría de extracciones, pruebas de bombeo y toma de muestras de agua y análisis físico-químico. Con la información hidrogeológica se planteó un balance que indicó que la recarga total media anual era de 61 hm³/año, mientras que la extracción se calculó en 73.5 hm³/año, concluyendo que el acuífero presentaba condiciones de equilibrio.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE OJOCALIENTE. Realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 1997. Los trabajos tuvieron como objetivo actualizar el conocimiento del flujo subterráneo y realizar mediciones piezométricas en pozos de la red de monitoreo para elaborar las configuraciones del nivel estático y evaluar la red de monitoreo actual para establecer las modificaciones necesarias para rediseñar la red definitiva. Propone la construcción de obras nuevas para establecer una red piezométrica definida.

CUANTIFICACION DE LOS VOLUMENES DE EXTRACCION DE LOS ACUIFEROS INTERESTATALES: VALLE DE AGUASCALIENTES, ENCARNACION Y OJOCALIENTE, ESTADOS DE AGS., JAL., Y ZAC. Realizado por Gondwana Exploraciones S.C., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2001. Este trabajo consistió en la aplicaron de distintos métodos para cuantificar el volumen de extracción para uso agrícola; entre ellos evaluar la eficiencia electromecánica de los pozos y el consumo de energía eléctrica, o la percepción remota mediante análisis, procesamiento e interpretación de imágenes de satélite, para conocer las superficies de los diferentes cultivos y con la lámina de riego aplicada conocer el volumen utilizado.

ESTUDIO DE INSTRUMENTACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS OJOCALIENTE, LORETO Y VILLA HIDALGO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la Universidad Autónoma de Zacatecas, para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2013.

Los objetivos generales fueron seleccionar pozos de la red de monitoreo e instalar transductores de presión en forma permanente, para registrar de manera programada y automática las variaciones de los niveles del agua subterránea en forma simplificada y confiable, determinar su evolución en el tiempo como resultado de las variables que intervienen en el proceso de recarga y descarga y conocer su condición actual.

Con la piezometría recabada y la histórica se elaboraron las configuraciones del nivel estático, que junto con la información de tipo hidrogeológico generada y recopilada se utilizó para actualizar el balance de aguas subterráneas, para calcular la recarga media anual que recibe el acuífero y determinar su disponibilidad.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO OJOCALIENTE, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático. El último estudio y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo 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 porción occidental se ubica en la Sierra Madre Occidental y la región oriental en el Mesa Central.

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 Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos y Mesa del Centro, Subprovincias Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes y Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas.

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.

La Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la 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.

La Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes se caracteriza por sus extensas llanuras con pisos de caliche y una muy somera cubierta aluvial, que se encuentran a altitudes alrededor de los 2,000 m. Su expresión principal es la de llanura desértica de piso rocoso, seguida por los sistemas de topoformas lomerío con cañadas, sierra baja, sierra baja con mesetas y meseta. 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.

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_s1kw.

Es clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), 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 la temperatura media 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 6 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: San Jerónimo, Palmillas, Genaro Codina, San Pedro Piedra Gorda, Luis Moya y Sierra Vieja. Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más grande 1942-2012 y el más corto 2005-2012, y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **454.5 mm, 15.9** °C y **2,026.5**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago, Subregión Hidrológica Alto Santiago, cuenca del Río San Pedro. Una pequeña área de la porción suroccidental pertenece a la cuenca Presa El Niágara. La única corriente superficial de importancia está representada por el Río San Pedro, que es afluente del Río Aguascalientes, el cual confluye al Río Santiago. El Río San Pedro, es de carácter intermitente y en general sus volúmenes escurridos son pequeños. Los arroyos son efímeros y entre ellos destaca los conocidos con los nombres: Dolores, Las Tinajas, Corral Barranco, San Antonio, El Vaquero y Las Bocas.

La Presa San Pedro Piedra Gorda es la obra hidráulica más importante, tiene una capacidad de almacenamiento de 5.0 hm³ que beneficia el riego de 651 ha, controla prácticamente en su totalidad los escurrimientos de este río.

Existen, además, aproximadamente 48 pequeños bordos de almacenamiento, con una capacidad total de 9.2 hm³, entre los cuales destacan: Boquillas, Las Adjuntas, El Divisadero, Tlacotes, Palmira, El Griego, El Coecillo, Santa Gertrudis, Los Conos, El Colorado, Los Tepetates, El Jagüey y Berriozábal.

3.4 Geomorfología

En el área que cubre el acuífero se localizan cuatro unidades geomorfológicas principales: la primera representa el límite suroccidental del valle y corresponde a la Sierra Fría, la segunda unidad es la zona en la que se desarrollan amplios valles, de origen tectónico, como en el que se aloja el acuífero Ojocaliente y su continuación hacia el Valle de Aguascalientes.

La Sierra Fría está integrada por un conjunto de elemento topográficos con elevaciones máximas de 3,000 msnm, que presentan una orientación sensiblemente norte-sur, en la que se desarrollan pendientes abruptas con diferencias de hasta 100 m respecto del cauce de los ríos y arroyos que la disectan, formando cañadas estrechas. Presenta una red de drenaje de tipo dendrítico.

La tercera unidad se presenta bordeando la sierra en forman de una franja, orientada en el mismo sentido norte-sur, integrada por un conjunto de extensas mesetas cuyas elevaciones son menores a 2,450 msnm, que se caracterizan por presentar límites abruptos, generalmente verticales, hasta de 100 m de altura con respecto del fondo de las cañadas.

Presentan drenaje de tipo dendrítico y subparalelo, este último generado por el sistema de fracturamiento de las rocas. Dentro de este conjunto se desarrolla también un sistema de elevaciones topográficas máximas de 2,500 msnm, que presentan cañadas poco profundas, menores de 100 m; en el que el drenaje es de tipo subparalelo y sensiblemente radial. Sin embargo las diferencias de elevación con respecto al valle, puede superar 500 m en las áreas de mayor elevación. Al norte y oeste se presenta la cuarta unidad, representada por bajadas aluviales y lomeríos con elevaciones mínimas de 1950 msnm.

Los valles se desarrollan entre las sierras, presentan pendientes suaves, ocasionalmente interrumpidas por lomeríos, y una diferencia máxima de altura de 60 m con respecto a las mesetas. Sus elevaciones varían de 2,100 msnm, en la porción norte, a 1,800 en el extremo sur.

El elemento más importante de este conjunto morfológico es el que se desarrolla en la zona comprendida desde Ojocaliente y Luis Moya en el estado de Zacatecas, pasando por Rincón de Romos, Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo y Aguascalientes, en el estado de Aguascalientes, hasta Encarnación de Díaz en el estado de Jalisco, que constituye el denominado Graben de Aguascalientes.

4 GEOLOGÍA

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

A nivel regional, la unidad más antigua corresponde al Triásico Superior y está conformada por una secuencia de rocas metamórficas y metasedimentarias que presentan metamorfismo de bajo grado en facies de esquistos verdes, que afloran al noreste y suroeste de la ciudad de Zacatecas, conocida como Formación Zacatecas. Al sureste aflora una secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada en facies de esquistos verdes que aflora en el distrito minero de Tepezalá, donde cabalga a rocas del Cretácico Inferior, cuya edad se asigna al Jurásico Superior y se denomina Formación Cieneguitas (Dávila et al., 1988).

Se encuentra en contacto tectónico con el Grupo Fresnillo del Cretácico Inferior (Carta Geológico-Minera Zacatecas F13-6, escala 1:250,000. SGM 1997). Sobre ella descansa concordantemente la unidad nombrada informalmente como Formación El Varal (Velasco H.M. 1989), conformada por calizas, lutitas con bandas y nódulos de pedernal; ambas unidades afloran de manera aislada en forma de ventanas estructurales, presentan metamorfismo regional de bajo grado y están intrusionadas por un tronco diorítico de edad Cretácico Inferior.

Durante el Terciario en el occidente de México se presentó la influencia de un arco magmático generado por la tectónica convergente, dando lugar a la emisión de rocas volcánicas que conforman la Sierra Madre Occidental. Mc Dowell et al. (1979) establece que esta sierra está constituida por dos secuencias ígneas:

Una inferior que consta principalmente de rocas ígneas intermedias con edades que varían de 45 a 95 Ma (Paleoceno) que corresponden con derrames, flujos piroclásticos y algunas intercalaciones de flujos ignimbríticos.

La secuencia superior y más reciente está integrada por una potente cubierta de ignimbritas que de acuerdo con Demant et al. (1975) puede alcanzar 1000 m de espesor, cuya edad se considera entre 27 y 34 Ma (Oligoceno).

A partir del Mioceno Medio se generó un nuevo evento volcánico bimodal que corresponde a la manifestación del Eje Neovolcánico, las rocas más antiguas de este evento son de composición andesítica.

El Mioceno Superior se manifiesta por la presencia de tobas riolíticas, que afloran al sureste de la ciudad de Aguascalientes, así como como basaltos que se exhiben en forma de coladas.

Durante el Neógeno se depositó una secuencia de areniscas arcillosas, rellenando las fosas tectónicas, capas de conglomerados y tobas líticas de color blanco; así como horizontes de gravas empacados por arenas gruesas y medianas y cenizas, cuyo espesor es superior a 200 m.

Posterior a esta secuencia, se presentan conglomerados oligomícticos y polimícticos del Plioceno Medio, sobre los que descansan derrames basálticos del Plioceno, que a su vez son cubiertos por tobas basálticas.

Las rocas intrusivas cortan la secuencia volcánica terciaria y afloran de manera restringida, son de composición granítica, granodiorítica y diorítica. En algunas localidades se observa la presencia de cuerpos intrusivos de tipo pórfido andesítico y dacítico, que afectaron a este paquete volcánico y a los que se les atribuye la mineralización en algunos sitios.

Los eventos volcánicos se manifestaron hasta el Plio-Cuaternario. Durante el Pleistoceno-Holoceno se depositaron cenizas riolíticas y lapilli, que presentan estratificación masiva, y arenas finas con estratificación cruzada, con presencia de restos de vertebrados. Rellenando las depresiones topográficas, se encuentra material aluvial, constituido principalmente por gravas, arenas y limos, principalmente al norte de la ciudad de Aguascalientes (Carta Geológico-Minera F13-9 "Aguascalientes", escala 1:250,000. SGM, 1998). (figura 2).

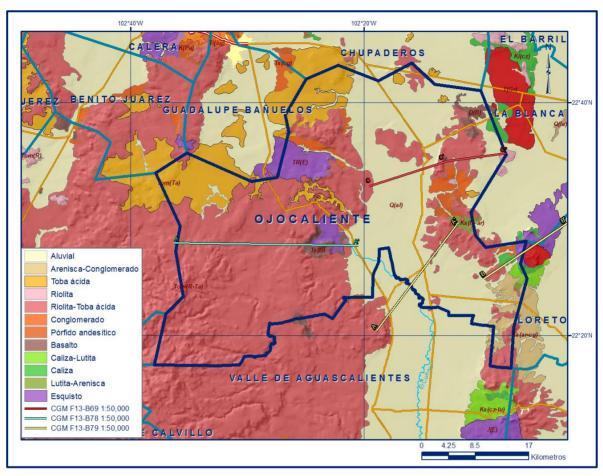


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la zona en la que se ubica el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuyo registro estratigráfico varía del Triásico Superior al Reciente. Debido a la existencia de los elementos tectono estratigráficos 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.

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.

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Cieneguitas

Nombre propuesto por Dávila et al., (1988) para la secuencia vulcanosedimentaria constituida por sedimentos psamíticos y calcáreos metamorfoseados de facies de facies de esquistos verdes, con algunos meta basaltos y filitas (Aranda, 1984); que aflora en el distrito minero de Tepezalá, Aguascalientes, donde se encuentra cabalgando a rocas calcáreo-arcillosas del Cretácico Inferior. Se encuentra también en contacto tectónico con el Grupo Fresnillo del Cretácico Inferior.

CRETÁCICO INFERIOR

Unidad Vulcanosedimentaria

En el área del acuífero se distinguen dos unidades de esta secuencia: la base está constituida por materiales vulcanosedimentarios depositados en un medio acuoso y la cima conformada por una secuencia de sedimentos clásticos que en gran parte se encuentran metamorfizados.

Sus principales afloramientos se localizan en la porción norte del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Santa Teresa, Ojocaliente y Cuauhtémoc, en el acuífero vecino Ojocaliente del estado de Zacatecas; así como en localidades restringidas ubicadas al oeste de la Ciudad de Aguascalientes. Se correlaciona con los grupos Fresnillo y Noria de Ángeles (Espinoza, 1991), constituidos por areniscas, filitas, calizas arcillosas, bancos calcáreos-dolomíticos y zonas de esquistos sericíticos, que sobreyacen discordantemente a la Formación Chilitos.

Unidad de andesitas-filitas

Está constituida por lavas de composición andesítica de color verde oscuro, con estructura de almohadillas en algunas porciones, foliación bien definida y textura afanítica, intercaladas con horizontes irregulares de material arcilloso de color verde oscuro. Se observan también estructuras sigmoides producidas por tectonismo y en ocasiones brechamiento, que se atribuye al enfriamiento repentino al entrar en contacto con el agua. Por su grado de deformación resulta incierto determinar su espesor, dentro del área de estudio aflora el contacto inferior; el contacto superior con los terrígenos pelíticos y psamíticos que le sobreyacen, es normal. De acuerdo con la asociación litológica que presenta la unidad, se puede establecer que su depósito se llevó a cabo en el Berriasiano, por lo que resultan parcialmente correlacionables con la Formación Taraises del Terreno Sierra Madre (CRM, 2001).

Unidad de areniscas-filitas

Conformada por metasedimentos que en ocasiones no presentan rasgos de metamorfismo o bien se presenta de manera incipiente, por lo que se identifica claramente que su protolito corresponde a una secuencia clástica constituida por lutitas, limolitas y areniscas. Generalmente presenta metalutitas, metalimolitas y metareniscas, con grado de metamorfismo variable, desde pizarras y filitas, las más frecuentes, hasta esquistos con bajo grado de metamorfismo (facies de esquistos verdes). La secuencia no metamorfizada o con incipiente grado de metamorfismo, consiste de una serie de estratos de areniscas intercalados con paquetes de lutitas y limolitas, que en ocasiones presenta un horizonte delgado de calizas intercalado dentro de la secuencia terrígena.

Las rocas presentan una clasificación buena a media, en la que los fragmentos son de tamaño mediano y de forma angulosa y subangulosa, en ocasiones con algunos horizontes de arenas gruesas que cambian repentinamente en forma vertical a arenas medias a finas. Toda la secuencia se encuentra muy deformada, en la que se observan pliegues muy apretados y totalmente recostados, así como fuerte cizallamiento, en ocasiones de aspecto cataclástico. Debido a su grado de deformación es difícil estimar su espesor, el Servicio Geológico Mexicano calcula un espesor aproximado de 500 m en el área de Fresnillo.

Se correlaciona con la secuencia sedimentaria que Cserna (1976) denominó informalmente como Grupo Proaño, que aflora en las inmediaciones de Fresnillo, Zac., constituida por grauvacas y lutitas calcáreas-carbonosas, cuya edad asignada corresponde al Hauteriviano-Aptiano, por lo que se correlaciona en tiempo con las formaciones Taraises y La Peña del Terreno Sierra Madre.

Calizas y lutitas

Corresponde a una secuencia de calizas de estratificación delgada, a veces arcillosas, intercalada con horizontes laminares de lutitas y limolitas, sin utilizar un nombre formacional debido a que, para esta zona, aparentemente no existe un consenso de criterios para designarlas con algún nombre formal o informal. Aflora principalmente en la región norte, en las inmediaciones de Ojocaliente, Tepezalá y al oeste de la Ciudad de Aguascalientes. Presenta bandeamiento o laminación, a veces muy fina, que se atribuye a la inclusión de sedimentos arcillosos dentro de la secuencia carbonatada, así como pequeños nódulos, bandas delgadas y lentes alargados de pedernal.

Debido a que la secuencia está muy deformada, es difícil medir su espesor. Sin embargo, en el área de Ojocaliente, Zacatecas, al suroeste de Pastoría, se calcula que su espesor es de al menos 200 m. Sobreyacen en contacto transicional a los metasedimentos de la unidad Areniscas-Filitas y subyace en discordancia litológica a los sedimentos y materiales volcánicos del Terciario.

Por su posición estratigráfica y su contenido microfaunístico se le asigna una edad correspondiente al Albiano-Cenomaniano.

La presencia de microorganismos de mar abierto, la textura de grano fino y la presencia de horizontes arcillosos, indica que su depósito se llevó a cabo en un ambiente marino profundo en condiciones de baja energía.

TERCIARIO

Conglomerado Rojo de Zacatecas

Corresponde a una secuencia de depósitos fluviales en capas de conglomerados polimícticos que presenta una matriz roja y algunas intercalaciones de materiales vulcanoclásticos, areniscas y gravas o guijarros rojos; cuyos tamaños varían entre 0.2 y 20 mm.

Esta unidad varía de pobre a bien consolidada con estratificación lenticular a semiparalela, de espesor de estratos que varías de 0.5 a varios metros. Aflora en una pequeña región ubicada al este, cerca de la localidad Milagros, y en las inmediaciones de El Tepetate, ubicado al sureste del acuífero.

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

Terciario Volcánico Riolítico

El paquete de rocas volcánicas que fueron eyectadas durante el Terciario está conformado por una gran diversidad de composiciones, predominando la riolítica y únicamente hacia la base de la secuencia se presentan delgados horizontes andesíticos. A continuación, se presenta la descripción de las diferentes rocas volcánicas terciarias.

Secuencia Volcánica Basal

Está representada por flujos piroclásticos de textura brechoide que frecuentemente afloran en las zonas de contacto con la columna metasedimentaria del Mesozoico.

Presenta pseudoestratificación en la que espesor varía desde unos cuantos centímetros, hasta capas medianas y gruesas de regular continuidad lateral, con oquedades producidas por el desprendimiento de los fragmentos líticos que ocasionalmente contiene. Los flujos de detritos corresponden con la porción conglomerática y se presentan comúnmente intercalados entre tobas.

Se observan horizontes o lentes de espesor variable constituidos principalmente por fragmentos volcánicos de composición riolítica, y en menor proporción fragmentos de calizas, rocas metamórficas y granito.

El conjunto litológico es compacto, medianamente resistente a la erosión, de densidad baja, alto grado de porosidad y poco fracturadas.

En ocasiones presenta rocas andesíticas de estructura masiva y textura afanítica a porfídica, como sucede en las márgenes del Río San Pedro, en las inmediaciones del poblado Genaro Codina.

Flujos piroclásticos riolíticos

Su distribución está asociada a la mayoría de los derrames volcánicos en diferentes niveles estratigráficos del conjunto volcánico terciario, expuestos principalmente en la mayor parte de la Sierra Fría. Forman horizontes de estructura masiva de hasta 6 m de espesor, de textura arenosa y comúnmente con fragmentos líticos, soportados en una matriz arenosa fina.

Se presentan en forma compacta, moderadamente resistentes a la erosión, porosos y con facturas, algunas de ellas rellenas de material piroclástico más fino. Frecuentemente presenta asociadas brechas volcánicas, con abundantes fragmentos de riolitas de hasta 10 cm de tamaño; entre estos cuerpos se presentan delgados horizontes de flujos piroclásticos de textura arenosa, con abundantes líticos, preferentemente emplazados hacia la zona de contacto con las lavas riolíticas. El espesor de las distintas unidades piroclásticas es muy variable, hasta de 300 m; los más potentes en las inmediaciones del cuerpo principal de la Sierra Fría.

Ignimbritas

Esta unidad está ampliamente distribuida en la región y se encuentra asociada al cuerpo principal de la Sierra Fría, ocupando diferentes niveles estratigráficos dentro de la secuencia volcánica terciaria. Afloran en forma de cuerpos tabulares, conformando la morfología característica de mesetas, son de color rosa grisáceo y rosa pardo que intemperizan a color pardo rojizo y pardo grisáceo.

Generalmente presentan estructura de aspecto masivo con abundantes vesículas originadas por el escape de gases y fragmentos de pómez, así como bandeamiento que indica el flujo de las lavas. Su textura es frecuentemente porfídica en un matriz afanítica, vítrea en la que están soportados fragmentos de vidrio y cristales de cuarzo y feldespatos, a veces soldados por la misma matriz.

Se presentan compactas, resistentes a la erosión, de baja permeabilidad y porosidad, con un importante desarrollo de fracturamiento vertical, en forma de columnas, que origina los típicos escarpes. Su disposición estructural subhorizontal permite definir espesores que varían de 50 a 150 m de potencia.

Riolitas

Agrupan flujos y estructuras dómicas formados por lavas de composición riolítica que se distribuyen en toda el área, teniendo su más amplio desarrollo en la extensa e imponente secuencia volcánica de la Sierra Fría y conformando los elementos topográficos de mayor elevación. Se presenta en forma de derrames de lava, de color rosa claro, en ocasiones con tonos pardos y rojizos, que al intemperismo muestran color pardo rosado o rosa grisáceo; con estructura masiva y fluidal. Generalmente constituyen domos y en donde presentan escarpes se desarrolla fracturamiento vertical que ocasiona la formación de columnas. En la Sierra Fría su espesor puede alcanzar 500 m de potencia. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad Oligoceno-Mioceno

Terciario Vulcanoclástico

Término que se utiliza para distinguir una serie de materiales vulcanoclásticos transportados por corrientes fluviales y depositados sobre las porciones más bajas que se localizan en la zona central del Valle de Aguascalientes.

Está conformado por un paquete de material arenoso dispuesto en capas delgadas con estratificación burda, en capas de 3 a 10 cm de espesor, de granos de cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos.

En ocasiones presentan conglomerados con fragmentos de rocas volcánicas riolíticas, soportados en una matriz areno tobácea, medianamente consolidados y deleznables, así como horizontes de caliche intercalados con las areniscas. No se puede determinar su espesor y solo conforma lomeríos que no rebasan los 15 m de altura.

Cubren de manera parcial y discordante a las tobas riolíticas y brechas volcánicas polimícticas de la base del Oligoceno, así como a la secuencia vulcanosedimentaria y subyace de la misma manera a los materiales residuales del Holoceno.

Por su posición estratigráfica y la naturaleza de los materiales que la integran, se considera que su edad corresponde al Mioceno.

Rocas intrusivas Pórfido Riolítico

Este tipo de rocas subvolcánicas se presentan en forma de pequeños apófisis, domos y cuellos volcánicos. Presentan diferentes tipos de texturas, como faneríticas, con facies porfídicas y fracturadas. Aflora en una pequeña porción ubicada al este del acuífero, cerca al poblado Milagros. Estratigráficamente en las regiones poniente, centro y sur, se encuentran afectando discordantemente a las rocas del Grupo Volcánico Superior formado por riolitas-ignimbritas e ignimbritas-riolitas.

A estas rocas se les asignó una edad de Neógeno (Terciario Superior), aunque estudios en la región Asientos-Tepezalá, ubicada al suroeste, indican que podrían ubicarse en el Cretácico Superior-Terciario Inferior.

Pórfidos Andesíticos

Son rocas hipabisales que se presentan en forma de pequeños apófisis. Litológicamente son de estructura compacta, textura fanerítica y coloración gris oscura. Los pórfidos andesíticos se encuentran afectando tanto a rocas volcánicas del Terciario, como a las secuencias vulcanosedimentarias de Triásico Superior y Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Afloran en las inmediaciones de San Pedro Piedra Gorda, Cerro El Morro y Cerro El Vaquero. Se pueden relacionar a los eventos tectónicos mineralizadores ocurridos acaecidos durante la culminación de la Orogenia Laramide, y a fenómenos de extensión del "Basin and Range". La edad que se les asigna es del Neógeno (Terciario Superior).

CUATERNARIO

Basaltos

Flujos de lavas basálticas de color negro que al intemperismo muestran un color gris oscuro con tonos pardos, de estructura masiva, que al intemperizarse forman bloques irregulares o en ocasiones esféricos; presentan textura afanítica y estructura vesicular, fracturamiento variable con algunas fracturas rellenas de calcedonia.

Por su posición estratigráfica y por su asociación con los basaltos que afloran en otras localidades de la región, se les asigna una edad correspondiente al Pleistoceno, que representan el último evento magmático reconocido en la región asociado con extravasaciones de material muy profundo a través de zona de debilidad cortical.

Afloran en un área pequeña, cerca de Barranca El Salto, ubicada al suroeste del acuífero.

Aluvión

Está constituido por fracciones de conglomerados y de arenas con estructura masiva o pobremente estratificada, poco consolidados a sueltos. Los fragmentos presentan en general formas subredondeadas a subangulosas.

La porción arenosa se mezcla con limos y arcillas, y en ella se aprecian generalmente granos de cuarzo y de feldespatos. Sobre estos materiales se observa una capa de suelo areno-arcilloso cubierta ocasionalmente por costras de caliche. Cubre discordantemente a la secuencia vulcanosedimentaria, así como a las tobas y conglomerados del Oligoceno; su espesor varía de 5 a 10 m y su edad corresponde al Holoceno.

4.2 Geología estructural

Las rocas metamorfizadas presentan estructuración plana bien desarrollada, en ocasiones puede apreciarse una segunda foliación. La orientación preferencial de la primera foliación es NW-SE con inclinación variable al NE y SW. La geometría indica que la foliación se encuentra plegada y el plegamiento está relacionado a la segunda fase de foliación.

Estas estructuras están también asociadas a las cabalgaduras que afectan a las rocas mesozoicas, por lo que se piensa que la deformación se desarrolló antes del depósito de las rocas volcánicas, es decir, durante el Cretácico Superior-Terciario Inferior.

Posteriormente se desarrolla una fase de deformación extensiva que produce fallamiento normal generando fosas y pilares en dirección general NNE-SSW. Bajo este ambiente de arco magmático se desarrollaron las condiciones metalogenéticas que enmarcaron el emplazamiento de la mayoría de los depósitos de minerales durante el Oligoceno-Mioceno. Los lineamientos de mayor importancia presentan rumbos NNE y NNW, con longitudes de 5 a 50 km y los curvilineamientos de 5 a 10 km de diámetro.

Asociadas a estas estructuras se presentan zona mineralizadas como es el distrito minero de Zacatecas (Carta Geológico-Minera Zacatecas F13-6, escala 1:250,000. SGM 1997).

Desde el punto de vista estructural, la morfología del área del acuífero está definida básicamente por eventos tectónicos distensivos que han definido estructuras regionales de gran importancia, como el llamado Graben de Aguascalientes, delimitado por fallas normales de orientación norte-sur, el cual fue rellenado principalmente por materiales piroclásticos retrabajados que cubren a rocas volcánicas y sedimentos pre-cuaternarios.

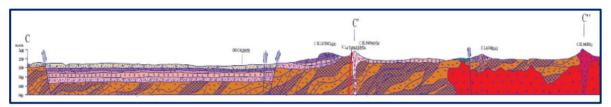
El dominio estructural del área es producto de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide y de diversos eventos distensivos, manifestados durante el Cenozoico, como producto del reajuste en el movimiento de las placas tectónicas que afectaron las rocas mesozoicas y cenozoicas de la región.

Las rocas metamórficas del Triásico Superior, en el distrito minero de Zacatecas, presentan por lo menos dos eventos de deformación con metamorfismo regional de bajo grado. La presencia de contactos miloníticos, foliación casi plana, alargamiento y rotación de minerales y plegamiento isoclinal, son indicadores que estas rocas sufrieron un transporte tectónico y cabalgamiento con dirección noroeste.

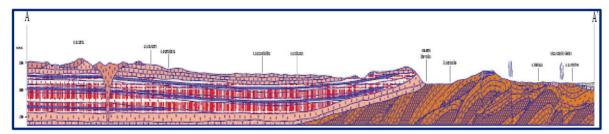
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geofísica obtenida en este estudio y otros previos, los cortes litológicos de pozos y las evidencias de campo, 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 y los conglomerados polimícticos que rellenan el valle tectónico.

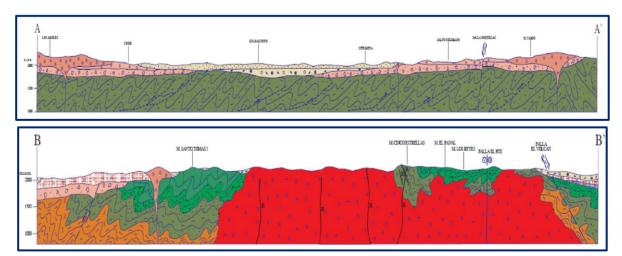
La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas por lutitas y limolitas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento, y por rocas metamórficas y metasedimentarias; así como localmente por rocas intrusivas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B69, Ojocaliente. Esc.1:50,000 (SGM, 1999)



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B78, Ciudad Cuauhtémoc. Esc.1:50,000 (SGM, 2001)



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B79, Luis Moya. Esc.1:50,000 (SGM, 2001) Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros en el centro del valle tectónico.

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.

En el valle 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 analizó la información de 6 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 0.1×10^{-5} a 1.0×10^{-5} m²/s; si consideramos un espesor saturado promedio de 60 m, los valores de conductividad hidráulica varían de 1.6×10^{-8} a 1.7×10^{-7} m/s (0.001 a 0.01 m/d).

Adicionalmente, se analizó la información de 30 pruebas de bombeo de larga duración realizadas en 2014 en el acuífero vecino al sur Valle de Aguascalientes, que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica, que fueron interpretadas por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico de Rathod y Rushton; además de otras realizadas en estudios previos en este mismo acuífero.

Los resultados de su interpretación indican que los valores medios de transmisividad varían de 0.1×10^{-3} a 15.5×10^{-3} m²/s y los valores de conductividad hidráulica entre 2.4×10^{-6} y 2.3×10^{-4} m/s (0.1 a 20.0 m/d).

Ambos parámetros, transmisividad y conductividad hidráulica, son representativos de materiales de granulometría fina, en general de permeabilidad media a baja. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

Sin embargo, estudios anteriores indican que el rendimiento específico puede variar de 0.1 a 0.3 para el medio granular y de 0.01 a 0.08 para el medio fracturado en las rocas riolíticas. Para fines del balance de aguas subterráneas se adoptó un valor de rendimiento específico promedio 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 del estudio realizado en 2013 así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años previos.

Para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 1997-2015.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el año 2015 muestra que los valores variaban, de manera general, de 60 a 120 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 menos profundos, de 60 a 80 m, se presentan en la región central y norte; en tanto que los más profundos, de 100 a 120 m, se registran a lo largo de los extremos oriental y occidental del acuífero (figura 4).

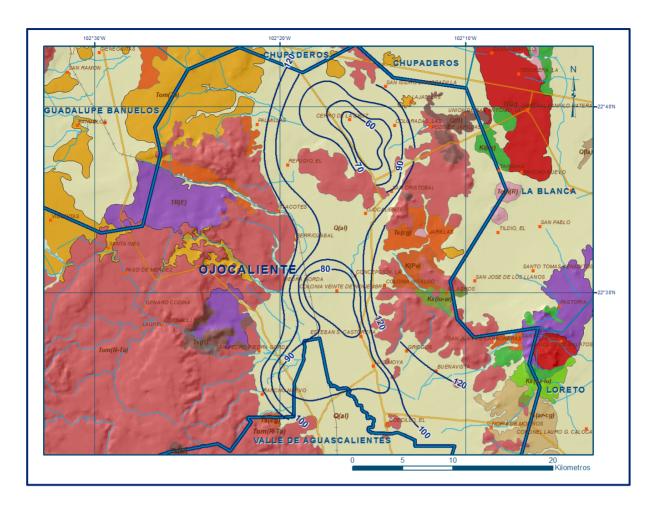


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

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 2030 a 1890 msnm, los cuales decrecen gradualmente desde la porción norte del acuífero hacia el valle aluvial localizado en la región centro y continuar hacia sur, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental, que finalmente tiende a dirigirse hacia el acuífero vecino Valle de Aguascalientes, en el estado de Aguascalientes.

Las menores elevaciones, de 1890 a 1920 msnm, se registran en la porción sur del acuífero, hacia el límite con el estado de Aguascalientes; en tanto que las mayores elevaciones, de 2020 a 2040, se presentan al norte, en la zona comprendida entre las poblaciones La Capilla, Las Coloradas y Las Lajas (figura 5).

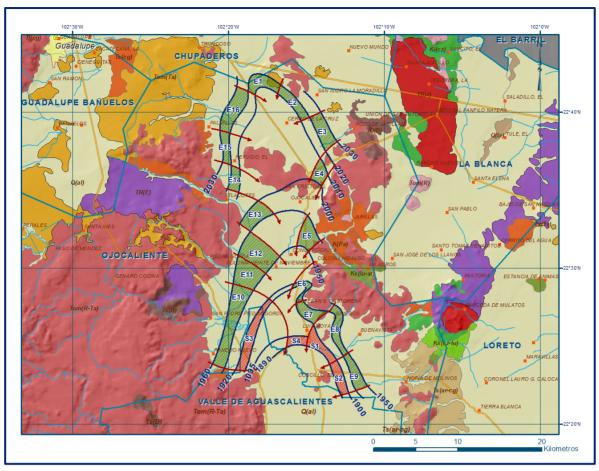


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

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 variaban de 5.0 a 30 m.

Se registran conos de abatimiento en las zonas de concentración de la extracción para uso agrícola, ubicadas al norte, en la porción central del valle y al sur del acuífero, hacia el límite con el estado de Aguascalientes. 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 5 a 15 m, con un ritmo promedio de 0.5 m anuales (figura 6).

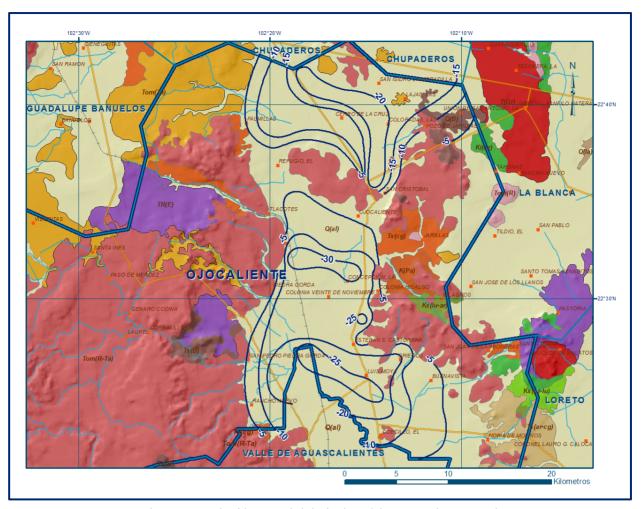


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (1997-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No existe información actualizada derivada de análisis químicos, la información más completa se refiere al estudio realizado en el año 1977, cuando se colectaron 87 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. Sólo como referencia se presentan los resultados.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaban de 256 a 780 mg/l, que no superaban 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.

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 eran inferiores a 2000 /S/cm y presentan valores extremos de 175 a 900 μ S/cm. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registraron al sur del acuífero y se incrementan en dirección general norte-sur, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Los valores más bajos se presentan en la región norte y occidental del acuífero.

Las temperaturas registradas variaron de 24.4 a 33.0 °C en tanto que el pH medido fluctuaba entre 5.6 a 7.8. Los valores altos de temperatura del agua y su pH se presentan en aguas termales, posiblemente asociadas a la presencia de focos termales y/o fallas en las rocas volcánicas.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia del agua que predomina es la bicarbonatada-sódica, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), casi la totalidad de las muestras de agua clasifican como C_2S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos más reciente llevado a cabo por la Comisión Nacional del Agua en 2009, se registraron un total de 906 obras que aprovechan el agua subterránea, 648 pozos, 251 norias y 7 manantiales; de las cuales 550 están activas y 356 se consideran inactivas.

De las obras activas, 392 se destinan al uso agrícola, 130 para uso público-urbano, 25 más para uso doméstico y pecuario y 3 para uso industrial.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **80.0 hm³ anuales**, de los cuales 77.2 hm³ (96.5 %) se destinan al uso agrícola, 1.2 hm³ (1.5%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.4 hm³ (0.5%) para usos pecuario y doméstico y 1.2 hm³ (1.5%) para uso industrial.

Adicionalmente, a través de **7 manantiales** se descarga un caudal de 16 lps, que equivalen a **0.5 hm³** anuales, destinados al uso agrícola.

7 BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1997-2015, en una superficie de **385 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = 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:

Recarga total - Descarga total = 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 red de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano son incipientes, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr).

7.1.1 Recarga Vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (Δ VS), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

$$Rv + Eh + Rr - B - Sh - Dm = \pm \Delta V(S)$$
 (1)

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal **Rr:** Recarga Incidental por retornos de riego

B: Bombeo

Dm: Descarga a través de manantiales

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

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

$$Rv = B + Sh + Dm + \Delta V(S) - Eh - Rr$$
 (2)

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2015 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

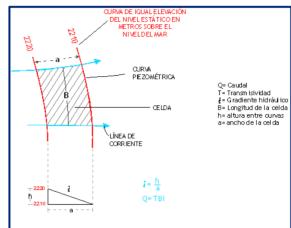
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Total entradas

15.3

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 **15.3 hm³/año**.

	LONGITUD B	ANCHO a	la la		т	CAUDAL Q	VOLUMEN
CELDA	LONGITODE	ANCHO a	h₂-h₁	Gradiente i			
5115 /((m)	(m)	(m)	Ordanomic I	(m²/s)	(m³/s)	(hm³/año)
E1	3500	1575	10	0.0063	0.0010	0.0222	0.7
E2	5250	1050	10	0.0095	0.0010	0.0500	1.6
E3	3850	1750	10	0.0057	0.0010	0.0220	0.7
E4	2100	1925	10	0.0052	0.0005	0.0055	0.2
E5	1925	2450	10	0.0041	0.0002	0.0016	0.0
E6	4375	790	20	0.0253	0.0005	0.0554	1.7
E7	3150	1310	20	0.0153	0.0010	0.0481	1.5
E8	5775	700	30	0.0429	0.0005	0.1238	3.9
E9	4550	1310	30	0.0229	0.0005	0.0521	1.6
E10	9800	1225	10	0.0082	0.0005	0.0400	1.3
E11	3500	2450	10	0.0041	0.0005	0.0071	0.2
E12	2625	3760	10	0.0027	0.0005	0.0035	0.1
E13	2450	1400	40	0.0286	0.0003	0.0210	0.7
E14	2975	1485	10	0.0067	0.0003	0.0060	0.2
E15	4200	965	10	0.0104	0.0003	0.0131	0.4
E16	5075	1750	10	0.0057	0.0005	0.0145	0.5

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

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, en este acuífero y en el vecino acuífero Valle de Aguascalientes, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, 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 60 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 77.2 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 3.9 hm³ anuales. **Rr = 3.9 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

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

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **80.0 hm³ anuales**.

7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

El caudal conjunto que descargan los 7 pequeños manantiales se estimó en 16 lps, que representan un volumen anual de 0.5 hm³. **Dm = 0.5 hm³/año**

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2015, mostrada en la figura 5.

En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **2.6 hm³/año.**

CELDA	LONGITUD B			Cuadianta :	Т	CAUDAL Q	VOLUMEN
CELDA	(m)	(m)	(m)	Gradiente i	(m²/s)	(m³/s)	(hm³/año)
S1	4375	960	10	0.0104	0.0003	0.0137	0.4
S2	4550	1225	10	0.0082	0.0003	0.0111	0.4
S3	9275	1070	20	0.0187	0.0003	0.0520	1.6
S4	2260	1610	5	0.0031	0.0008	0.0056	0.2
						Tota salidas	2.6

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2015)

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

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 Sy de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS: 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 propiciando una variación negativa del almacenamiento. El volumen de agua drenado en el intervalo 1997 – 2015, fue de -577.2 hm³, que representa un promedio anual de **-32.1 hm³** (tabla 4).

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

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km²)	Sy	ΔV(S) (hm³/año)
-5 a -10	-7.5	98.1	0.1	-73.6
-10 a -15	-12.5	46.0	0.1	-57.5
-10 a -20	-15.0	97.4	0.1	-146.1
-15 a -20	-17.5	55.3	0.1	-96.8
-20	-20	24.3	0.1	-48.6
-20 a -25	-22.5	39.5	0.1	-88.9
-25	-25	14.8	0.1	-37.0
-30	-30	9.6	0.1	-28.8
Área de balance		385.0	TOTAL	-577.2
		Promedio anual		-32.1

Solución de la ecuación de balance

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

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

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA	RECARGA	DESCARGA	_	EXTRACCIÓN DE
ANUAL DE AGUA DEL	TOTAL	NATURAL		AGUAS
SUBSUELO EN UN	MEDIA	COMPROMETIDA		SUBTERRÁNEAS
ACUÍFERO	ANUAL			

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego.

Para este caso su valor es **51.0 hm³/año,** de los cuales 47.1 hm³ son recarga natural y 3.9 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 **3.1 hm³ anuales**, de los cuales 2.6 hm³ corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el acuífero Valle de Aguascalientes y 0.5 hm³ a la descarga a través de los manantiales.

Por lo tanto, **DNC = 3.1 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), 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 **65,218,073** m³ anuales, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) 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.

DMA = R - DNC - VEAS

DMA = 51.0- 3.1- 65.218073

DMA = -17.318073 hm³/año.

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **17,318,073 m³ anuales.**

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1997. Estudio para la Reactivación de Redes de Monitoreo del Acuífero del Valle de Ojocaliente, realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Ojocaliente, estado de Zacatecas.