

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO GUADALUPE DE LAS CORRIENTES (3223), ESTADO DE ZACATECAS

Contenido

1	GENERALIDADES	2
An ⁻	tecedentestecedentes	2
1.1	Localización	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	5
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	Geomorfología	9
4	GEOLOGÍA	10
4.1	Estratigrafía	11
4.2	Geología estructural	18
4.3	Geología del subsuelo	19
5	HIDROGEOLOGÍA	21
5.1	Tipo de acuífero	21
5.2	Parámetros hidráulicos	21
5.3	Piezometría	22
5.4	Comportamiento hidráulico	22
5	.4.1 Profundidad al nivel estático	22
5	.4.2 Elevación del nivel estático	23
5	.4.3 Evolución del nivel estático	24
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	26
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	27
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	27
7.1	Entradas	28
7	.1.1 Recarga vertical (Rv)	28
7	.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	29
7	.1.3 Recarga incidental (Rr)	30
7.2	Salidas	30
7	.2.1 Extracción por bombeo (B)	31
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS)	31
8	DISPONIBILIDAD	32
8.1	Recarga total media anual (R)	32
8.2	Descarga natural comprometida (DNC)	32
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	33
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	33
9	BIBLIOGRAFÍA	

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 Guadalupe de las Corrientes, definido con la clave 3223 por la Comisión Nacional del Agua se localiza en la porción centro-norte del estado de Zacatecas, entre los paralelos 23°20 y 24°15´ de latitud norte y entre los meridianos 102°03´ y 102°52´ de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,633 km². Limita al norte con el acuífero Camacho; al este con el acuífero El Cardito, al sureste con Puerto Madero, al sur con los acuíferos Calera y Chupaderos, al suroeste con Aguanaval y al oeste con El Palmar, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1).

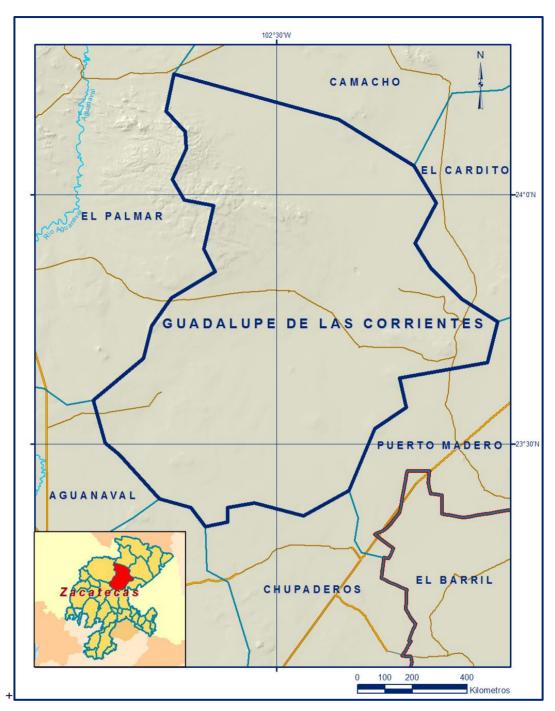


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero comprende casi la totalidad del municipio Cañitas de Felipe Pescador, la mayor parte de Villa de Cos y General Francisco R. Murguía, así como porciones menores de Mazapil, Río Grande y Fresnillo.

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

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

ACUIFERO 3223 GUADALUPE DE LAS CORRIENTES							
VERTICE	L	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
VERTICE	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	14	23.4	23	34	27.8	
2	102	18	10.5	23	31	52.8	
3	102	21	16.3	23	24	27.3	
4	102	26	42.1	23	21	25.5	
5	102	32	39.4	23	22	55.6	
6	102	35	50.5	23	22	23.1	
7	102	35	50.5	23	20	38.6	
8	102	38	319	23	20	5.3	
9	102	40	15.2	23	22	22.7	
10	102	44	2.3	23	23	26.2	
11	102	48	52.9	23	28	48.9	
12	102	50	35.1	23	30	9.3	
В	102	51	59.1	23	35	18.9	
14	102	45	59.3	23	40	20.5	
15	102	44	57.5	23	44	16.8	
16	102	42	37.6	23	47	36.7	
17	102	37	217	23	50	47.2	
18	102	38	40.9	23	53	310	
19	102	37	30.1	23	58	43.0	
20	102	41	5.3	23	59	22.5	
21	102	42	29.3	24	1	52.2	
22	102	40	48.4	24	5	32.3	
23	102	40	58.4	24	7	34.0	
24	102	43	16.2	24	10	3.8	
25	102	42	17.7	24	14	32.1	
26	102	22	29.6	24	9	6.8	
27	102	13	27.0	24	3	28.0	
28	102	10	46.1	23	59	18	
29	102	13	17.5	23	54	10.0	
30	102	11	26.4	23	51	16.6	
31	102	7	36.7	23	47	26.5	
32	102	3	22.7	23	44	44.8	
33	102	4	38.3	23	39	512	
34	102	15	10.2	23	38	0.5	
1	102	14	23.4	23	34	27.8	

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 dos decretos de veda. El primero rige en la mayor parte del acuífero y es 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 y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en esos Municipios" publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de abril de 1981. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

El segundo rige en la porción norte y suroccidental del acuífero y es 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 agua del subsuelo en los municipios señalados" publicado en el DOF el 5 de agosto de 1988. Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

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

El uso principal es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios de exploración geológica e hidrogeológica de evaluación.

De estos últimos, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS EN LA ZONA GUADALUPE DE LAS CORRIENTES, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado en 1979 por Constructora Pareya, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Los objetivos del estudio fueron conocer las condiciones geohidrológicas de la zona, localizar las áreas más apropiadas para la perforación de pozos y definir la extensión y posibilidades acuíferas de los sedimentos terciarios. Entre sus actividades de campo destacan el censo de aprovechamientos, muestreo de agua subterránea, reconocimientos geológicos y obtención de muestras de roca para análisis micropaleontológicos y radiométricos.

ESTUDIOS ELÉCTRICOS DE RESISTIVIDAD EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado en 1981 por Compañía Mexicana Aerofoto S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El estudio tuvo como objetivo realizar sondeos eléctricos realizados en algunas localidades de la zona de estudio, para evaluar el potencial hidrogeológico de los sitios explorados e identificar los sitios más adecuados para la perforación de pozos para uso agrícola.

ACTUALIZACIÓN DE ESTUDIOS GEOHIDROLÓGICOS DE LA PORCIÓN NORESTE DEL ESTADO DE ZACATECAS (ACUÍFERO GUADALUPE DE LAS CORRIENTES). Realizado en el año 2000 por Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general determinar las condiciones geohidrológicas de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga. Mediante la realización de actividades de campo, que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones.

Se realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total anual y determinar su disponibilidad media anual.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS DE: GUADALUPE DE LAS CORRIENTES, PUERTO MADERO, VILLA HIDALGO, PINOS Y ESPÍRITU SANTO. Realizado en 2010 por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., para la Comisión Nacional del Agua. Los trabajos contemplaron actualizar el conocimiento del flujo subterráneo y mediciones piezométricas mediante la definición de una red de pozos de monitoreo para elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea.

Consideró además la nivelación de brocales y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico; con la información generada y recopilada plantea el balance de aguas y determina la disponibilidad.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO GUADALUPE DE LAS CORRIENTES, 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 a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica totalmente en la Provincia Fisiográfica 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 la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro, en dos subprovincias, la porción norte en la Subprovincia Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande y la porción sur en la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas.

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 Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande se caracteriza por ser la subprovincia más accidentada, sus sierras, mesetas y lomeríos rodean un llano rocoso central, situado a unos 2,000 msnm, que está orientado burdamente de norte a sur; en tanto que en la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas dominan extensos terrenos áridos con lomeríos y sierras bajas sobre una gran llanura desértica situada a unos 2000 m de altitud con piso de caliche, que ocupa el 40% restante de la superficie.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en el área que comprende al acuífero predomina el clima de tipo BS₀kw, seco templado, con condición de canícula hacia la parte noreste de la zona en estudio; en la porción suroriental, en las inmediaciones de Cañitas de Felipe Pescador, se presenta el clima semiseco subtipo BS₁kw semiseco templado, y en el extremo noreste el subtipo BS₀hw seco semicálido.

El clima es seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo seco (₀), 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 cae en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 10 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: San Gil, Nuevo Tampico, Purísima de Sifuentes, Concepción de la Norma, Agua Nueva, San Andrés, Cañitas, Tierra y Libertad, Rancho Grande y Villa de Cos, cuyo registro comprende el periodo 1980-2009. Con estos datos y utilizando el método de isoyetas e isotermas, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **372 mm y 16.6** °C, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de total estiaje ocurre de marzo a mayo.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 37 "El Salado", cuenca "Fresnillo-Yesca". Está comprendida entre los meridianos 99°29' y 102°57' de longitud oeste y los paralelos 21°47' y 25°23' de latitud norte.

Su área es de 94,243 km²; limita al norte con la Región Hidrológica 24c, al noreste con la Región Hidrológica 25, al este y sureste con la Región Hidrológica 26, al suroeste con la Región Hidrológica 12 y al oeste y noroeste con la Región Hidrológica 36.

Es una de las vertientes interiores más importantes del país; se localiza en la altiplanicie septentrional y la mayor parte de su territorio se sitúa a la altura del Trópico de Cáncer, que lo atraviesa. Todo este conjunto hidrográfico está constituido por una serie de cuencas cerradas de muy diferentes dimensiones.

Localmente, el acuífero se localiza en la zona denominada "Cuenca de Guadalupe", que no tiene corrientes de importancia y solo algunos arroyos presentan escurrimientos en temporadas de lluvia, entre ellos los conocidos con los nombres:

San Antonio, Calabacillas, Charco La Cruz, Los Moreno, Doña Petra, Granadas y Hondo. En esta zona existe una serie de lagunas efímeras entre las destacan las conocidas con los nombres de San Juan de los Ahorcados, La Quemada, El Salado, La Campana, Honda y El Coyote.

3.4 Geomorfología

Entre las geoformas características de la región donde se ubica el área pueden distinguirse sierras, lomeríos y llanuras aluviales.

Las sierras más importantes son las de Guadalupe de Las Corrientes y San Julián, la primera se encuentra en la zona noroccidental del área, abarca una amplia superficie orientada en sentido NW-SE, con elevaciones que varían de 2,200 a 2,600 msnm, constituida principalmente por calizas de la Formación Cuesta del Cura y en menor proporción por calizas de la Formación Cupido en el núcleo de la sierra, y por calizas y lutitas de la Formación Indidura en los flancos. La sierra San Julián se localiza en la zona oriental, es una sierra alargada en dirección NW-SE con elevaciones entre 2,050 y 2,150 msnm, conformada por calizas de las formaciones Cuesta del Cura y Cupido.

Los lomeríos se encuentran distribuidos en toda la zona, con mayor presencia y continuidad en la porción sur, donde predominan las rocas sedimentarias.

Su forma y elevación están condicionadas por las rocas que los conforman: las lutitas y areniscas de la Formación Caracol dan lugar a lomeríos amplios y de poca altura; las calizas y lutitas de la Formación Indidura originan lomas alargadas de suave relieve y poca altura; mientras que las formaciones Cuesta del Cura y Cupido presentan cerros aislados redondeados con alturas de 50 y 100 m.

Las llanuras aluviales se encuentran principalmente en la región central del área, tienen un relieve relativamente plano con ligeras ondulaciones y un drenaje muy escaso e intermitente de tipo endorreico, sin corrientes superficiales de importancia, en las porciones altas donde afloran las calizas el tipo de drenaje es dendrítico e intermitente.

Están formadas por pequeños grabens tectónicos, que fueron rellenados por depósitos aluviales durante el Terciario y Cuaternario, depósitos lacustres y por rocas ígneas vulcanoclásticas, cuyos espesores varían de 100 a 300 m.

4 GEOLOGÍA

La región se ubica en la provincia geológica del Altiplano Mexicano, en su límite occidental con la provincia Sierra Madre Occidental; en ella se presentan tres ambientes geológicos definidos: los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1987) Parral, Guerrero y Sierra Madre, cuyos límites entre ellos se infiere que son tectónicos.

De estos terrenos, en la zona sólo está representado el Terreno Sierra Madre. Del Terreno Parral se podría interpretar la existencia de cambios de facies con la cubierta del Terreno Sierra Madre ya que afloran capas masivas de brechas calcáreas de facies de talud de posible edad Cretácico Inferior.

El basamento del Terreno Sierra Madre o Cuenca Mesozoica del Centro De México, está constituido por filitas y metareniscas con novaculitas de la Formación Taray, de posible edad Triásico Inferior-Medio que afloran en la Sierra de Teyra.

La cubre en discordancia derrames y tobas de andesita, dacita, riolita con horizontes de limolita y areniscas con metamorfismo que presentan facies de esquistos verdes,

Constituyen la Formación Rodeo-Nazas, de edad Triásico Medio a Jurásico Inferior. También muestra metamorfismo dinámico progresivo (Figura 2).

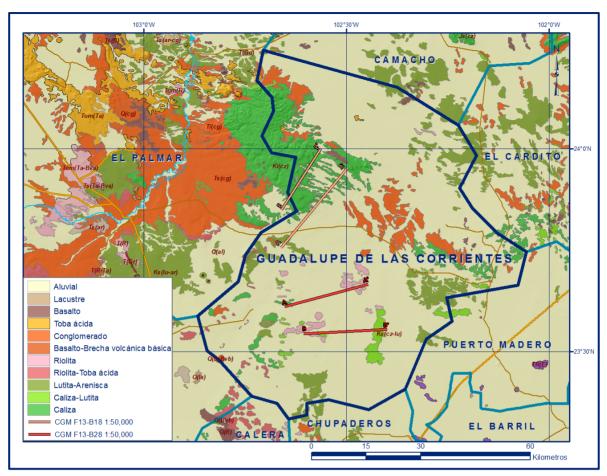


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna geológica de la zona de estudio, está constituida por rocas sedimentarias y materiales volcánicos, cuyas edades varían del Triásico al Reciente distribuidos principalmente en el Terreno Tectonoestratigráfico Sierra Madre, su distribución geográfica se muestra en la figura 2.

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. En el área del acuífero está representada por una secuencia vulcanosedimentaria constituida por derrames de andesita y estratos delgados a medianos de caliza, de edad Tithoniano-Neocomiano.

Esta formación presenta dos cambios laterales de facies; la primera es una secuencia de areniscas y lutitas de estratificación delgada a mediana, correlacionable con la **Formación Valdecañas,** y la segunda es una secuencia de areniscas y calizas de estratificación delgada a mediana, correlacionable con la parte superior de la Formación Valdecañas.

En ambas unidades se presentan intercalaciones de rocas volcánicas extrusivas y, muy puntualmente, la unidad de areniscas-calizas está intrusionada por un cuerpo ígneo de composición dioríticas, de edad Cretácico Inferior.

Este cuerpo diorítico se encuentra afectando principalmente a la unidad de areniscascalizas de la Formación Valdecañas y no se observa cortando a las unidades del
Terreno Sierra Madre, por lo que se puede interpretar como parte del paquete
alóctono que conforma a las rocas del Terreno Guerrero. 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

Formación Taray

Aflora principalmente en la Sierra de Teyra, formando un conjunto de rocas bandeadas, constituidas de grauvacas y filitas, con interestratos de novaculita, que cubren a la Formación Rodeo. La parte inferior de esta formación está constituida por filitas de color café claro y la parte superior por novaculitas, interestratificadas con dolomitas y grauvacas.

JURÁSICO

Formación Nazas

También conocida como Formación Huizachal, aflora en la Sierra de San Julián, del Teyra y en el Cerro de Europa.

Constituye una serie vulcanosedimentaria conformada por lavas interestratificadas con tobas, lutitas, areniscas y conglomerados que en el área del acuífero está representada por una secuencia sedimentaria dominada por limolitas y un conglomerado polimíctico de coloración rojiza con clastos de rocas andesíticas y riolíticas.

Aflora al noreste y sureste de Villa de Cos. De acuerdo con su carácter litológico y a su posición estructural se considera que los materiales que la conforman corresponden a un depósito de tipo "molasse" en un ambiente continental, con una intensa actividad volcánica y fallamiento en bloque, el cual estuvo asociado a un vulcanismo de composición calcoalcalino relacionado con la rápida apertura del Golfo de México.

Formación Zuloaga

Está representada por una caliza resistente a la erosión que forma los núcleos de los anticlinales en la que se distinguen dos unidades bien definidas: la parte inferior que contiene capas de caliza, cuyo color varía de gris claro a ligeramente oscuro, presenta una coloración rojiza o amarillenta al intemperismo, contiene también algunas capas de limolita calcárea débilmente consolidada.

La parte superior está constituida por caliza masiva de color gris, que se caracteriza por presentar estilolitas de gran amplitud y algunos horizontes donde se presentan pequeños nódulos de pedernal de color negro.

Aflora en las sierras plegadas ubicadas al norte del acuífero que rodean la planicie. Sobreyace discordantemente a la Formación Nazas y está cubierta en forma concordante por la Formación La Caja, su espesor aproximado es del orden de 500 m.

Formación La Caja

Consiste en capas delgadas de calizas margosas con pedernal, fosforitas, alternando con limolitas y areniscas bituminosas, que se hacen progresivamente más finas hacia la cima. Aflora en la mayoría de las sierras plegadas, generalmente en los núcleos anticlinales en forma de estrechas bandas paralelas que limitan a la Formación Zuloaga.

Debido a que es poco resistente a los agentes erosivos, frecuentemente se caracteriza porque en ella se desarrollan puertos y valles, que se alargan paralelamente al rumbo de las capas.

A menudo se encuentra enmascarada por una pequeña cobertura aluvial, su espesor es del orden de 100 m. Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Zuloaga y Taraises, respectivamente.

CRETÁCICO

Formación Taraises

Está constituida de caliza con cantidades menores de limolita, que descansan sobre sedimentos arcillosos de la Formación La Caja. En las partes altas de las montañas plegadas que forma, las capas de caliza son de espesor mediano a grueso, densas y de color gris claro a oscuro. La limolita que contiene se presenta intercalada en proporciones variables.

La Formación Taraises es un depósito que se llevó a cabo en aguas relativamente profundas, alcanza un espesor aproximado de 150 m.

Aflora en forma de franjas delgadas de poco espesor en las sierras plegadas ubicadas principalmente en la porción sur del acuífero, cuyos contactos, inferior y superior son concordantes con las formaciones La Caja y Cupido respectivamente.

Formación Cupido

Representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa de coloración gris claro, que presentan concreciones de pirita, lentes y nódulos de pedernal color gris y estilolitas; en algunas localidades con intercalaciones de limolitas calcáreas y en menor proporción lutitas. Sus mejores afloramientos se localizan en el Cañón Mimbre de la porción media de la Sierra de Parras, en Coahuila.

Dentro del área del acuífero aflora principalmente en las sierras plegadas de la porción sur, en donde sus contactos estratigráficos con la unidad inferior, Formación Taraises, y superior, Formación La Peña y la Formación Cuesta del Cura, son concordantes. Su espesor medio es de 300 m. Su espesor promedio en esta área se ha estimado entre 350 y 500 m. Su depósito ocurrió en una plataforma lagunar de aguas someras y tranquilas, templadas a cálidas, con buena oxigenación y poca influencia de arcillas, lo que permitió el desarrollo y crecimiento de abundantes organismos.

Formación La Peña

Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca. En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada.

Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte índice ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido. Sus afloramientos en el área del acuífero representan franjas de espesor reducido, asociadas a la Formación Cupido, a la cual sobreyace concordantemente.

A su vez, es cubierta concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. Aflora en el área del acuífero en la porción noroccidental de la Sierra de Guadalupe. Su espesor varía de unos cuantos metros hasta 100 m.

El contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Cupido, mientras que su contacto superior es nítido y concordante con la Formación Cuesta del Cura. Su depósito ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, en aguas sensiblemente profundas, bajo condiciones tectónicas inestable, lo que ocasionó el aporte abundante de sedimentos clásticos finos.

Formación Cuesta del Cura

Secuencia de calizas compactas, de estratificación delgada y ondulada, con nódulos y bandas de pedernal e intercalaciones delgadas de arcilla, que aflora en la porción noroccidental del área, sobre todo en la Sierra de Guadalupe.

La unidad consiste de calizas tipo "mudstone", dispuestas en capas que varían de 10 a 25 cm de potencia, cuyo espesor total es del orden de 200 a 300 m. La relación con la Formación La Peña es por medio de contacto nítido, mientras que el contacto superior con los sedimentos calcáreos-arcillosos de la Formación Indidura es concordante. El depósito de esta unidad se llevó a cabo en una zona de mar abierto, en un ambiente de cuenca poco profunda.

Formación Indidura

Se encuentra constituida en general por una secuencia calcárea arcillosa, conformada por calizas arcillosas, en capas que varían en espesor de 5 a 40 cm, con intercalaciones de calizas y lutitas calcáreas laminares.

La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente erosionable, que en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa.

El espesor total promedio de la formación es de 200 m y aflora ampliamente en la Sierra de Guadalupe. Sobreyace de manera concordante a la Formación Cuesta del Cura y subyace de igual manera la Formación Caracol. Su depósito ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, con una aportación intermitente de clásticos pelíticos, bajo condiciones tectónicas inestables de relleno de cuenca.

Formación Caracol

Unidad compuesta de areniscas de grano medio, con cementante calcáreo y matriz arcillosa, en capas de 20 cm de espesor, que muestran estratificación cruzada y turboglifos; intercaladas con limolitas y lutitas, y ocasionalmente con margas. Las lutitas son moderadamente calcáreas y suaves, de color oscuro localmente con ligero contenido de arena, mientras que la arenisca está bien consolidada y es resistente; está dispuesta en capas delgadas y gruesas que tienen colores gris pardo y verdoso.

Se estima que su espesor puede alcanzar los 1000 m de potencia; en el área, el contacto inferior con la Formación Indidura es transicional y concordante; mientras que el superior está cubierto de manera discordante por materiales más recientes. Los afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos en toda el área.

TERCIARIO

Formación Ahuichila

Definida por Rogers (1961) en los afloramientos expuestos en el "Frontón de Ahuichila", ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas. Fue descrita originalmente como una serie dominantemente detrítica de conglomerado polimíctico de color rojizo, compacto con textura clástica, constituido por fragmentos de 0.10 a 0.40 m de calizas, esquistos, granitos, riolitas, arenisca, lutita, caliza lacustre y andesitas, en una matriz arenosa, con intercalaciones de tobas y areniscas.

No aflora dentro del área del acuífero pero se le ha identificado fuera de su límite, hacia la zona de Sombrerete y Fresnillo. Regionalmente su espesor es muy variable, con un promedio de 250 m.

De manera local, se correlaciona con la Grava Peribañez (Córdoba D.A., 1965), constituida por fragmentos calcáreos sin clasificar, subangulosos y del tamaño que varía de 10 a 15 cm de diámetro, inmersos en una matriz arcillosa, escasamente cementados con carbonato de calcio; que aflora formando lomeríos de poca elevación al este de El Cardito, en el Cañón La Manga y al noroeste de la comunidad Puerto del Rosario.

Unidad Volcánica Basáltica

Se propone este nombre para denominar una serie de rocas volcánicas máficas que se encuentran cubriendo a las rocas pre-oligocénicas.

Principalmente están constituidas por derrames de basaltos que presentan coloración negra en superficie fresca y pardo-rojiza cuando se intemperiza; de textura vesicular a amigdaloide, con relleno de cuarzo y calcita, que aflora de manera aislada en la porción oriental del acuífero.

Rocas volcánicas riolíticas

Se denomina con este nombre a una secuencia de rocas piroclásticas en la base y un grueso paquete de riolitas fluidales en la cima. Los piroclásticos que subyacen al cuerpo de riolita están conformados por tobas arenosas, pómez y lapilli.

Se estima que el espesor máximo de esta unidad es del orden de 100 m; en la mayor parte del área sobreyace y subyace de manera discordante a las formaciones Caracol y Opal o depósitos aluviales más recientes, respectivamente.

Conglomerado Polimíctico del Neógeno Formación Opal

Está constituida principalmente por cuerpos de conglomerados polimícticos de guijarros de rocas carbonatadas y en menor proporción de clastos de rocas volcánicas, en general de formas subangulares a redondeados que están embebidos en una matriz areno-arcillosa con escaso material vulcanoclástico y lacustre. Su espesor en el área es muy variable ya que se trata de un depósito irregular, se le estima una potencia entre 150 a 250 m; su máximo espesor se presenta en la porción norte.

De acuerdo a sus características litológicas, su depositó se efectuó en un ambiente continental lacustre, favorecido por la acción de agentes erosivos, transportados por corrientes fluviales y depositados sus productos en cuencas intermontanas.

CUATERNARIO

Depósitos aluviales

Los materiales que constituyen esta unidad se encuentran rellenando las depresiones, generalmente sinclinales, como llanuras de piedemonte y llanuras aluviales que forman los rellenos de cuencas cerradas, denominadas bolsones.

Se encuentran representados en el área por depósitos de talud, terrazas aluviales, depósitos de acarreo en cauces de arroyos, así como en suelos residuales, limos y arcillas, que fueron depositados en las partes bajas y planas. Se encuentran cubriendo a rocas cretácicas y terciarias y tienen una distribución muy extensa en el área.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente la región se caracteriza por la abundancia de plegamientos, cuyos ejes de simetría presentan una orientación general NW-SE y NE-SW, algunos de ellos afectados por fallas inversas y cabalgamientos que son el resultado de procesos compresivos desarrollados posiblemente a fines del Cretácico y principio del Terciario (Pérez y Benítez, 1990) en el occidente del continente.

Durante el Terciario principalmente en el Eoceno, se llevó a cabo el emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos (stocks) originados por una fase distensiva que generó fallas y grabens con orientación NW-SE (Carta Geológico-Minera Matehuala F14-1, escala 1:250,000. SGM, 1996).

El marco estructural regional está definido por lo contactos de los Terrenos Guerrero, Parral y Sierra Madre, cuyos límites se caracterizan por presentar sistemas complejos de plegamientos asociados a cabalgaduras en un régimen de deformación dúctil. Se interpreta que el evento ocurrió durante la Orogenia Laramide en donde el Terreno Guerrero cabalgó sobre los Terrenos Sierra Madre y Parral.

Esta deformación, al interior del Terreno Sierra Madre, causó plegamiento formando anticlinales y sinclinales de rumbo NW-SE, con apilamiento de cabalgaduras en la Sierra de Guadalupe de las Corrientes, en un estilo de deformación contrastante al que existe en la región SW de la zona. Posterior al evento laramídico se desarrolló un evento distensivo con componente lateral izquierda, que causó zonas de cizallamiento que sirvieron para la inyección de intrusiones multifásicas de granitoides hipoabisales y domos, así como la extrusión de rocas volcánicas félsicas (Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-3, escala 1:250,000. SGM, 1998).

Localmente, las estructuras presentes en la secuencia vulcanosedimentaria al parecer fueron generadas por eventos compresivos orogénicos, asociados a la acreción del arco volcánico del Jurásico Superior, en el cual se desarrolló un depósito extenso de terrígenos en la cuenca post-arco (cuenca Mesozoica del Centro de México).

A finales del Cretácico Inferior el Terreno Guerrero se amalgama con el Terreno Sierra Madre por medio de un ensamble tectónico y a fines del Cretácico Superior, con la Orogenia Laramide del Cretácico Superior-Eoceno, las unidades de ambos fueron deformadas.

Después de la Orogenia Laramide ocurrió una fase distensiva que generó fallas normales de orientación NE-SW, como las conocidas con el nombre Cerro La Culebra, Cerros Prietos, Laguna Las Hormigas y Cerro San Julián, y con dirección NW-SE entre las que destacan Cerro La Mariola y Bajío Las Coloradas; ambas muestran basculamiento al NW y SE. La deformación dúctil-frágil se manifiesta por cabalgamientos como es la Loma La Majada Blanca y Cerro El Jabalí, donde están involucradas las unidades mesozoicas de los terrenos Guerrero y Sierra Madre.

El marco tectónico que domina la región de la Mesa del Centro son los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide y los posteriores eventos distensivos del Oligoceno-Mioceno que afectaron a las rocas mesozoicas y cenozoicas (Carta Geológico-Minera La Abundancia F13-B29, escala 1:50,000. SGM, 2009).

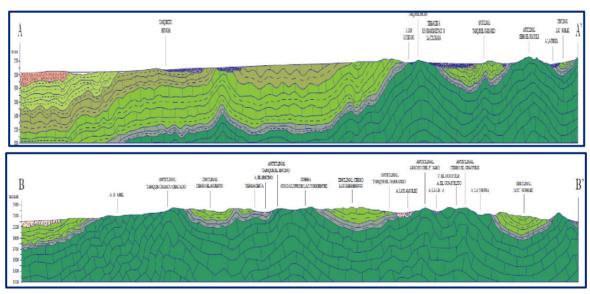
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, se puede afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares, y los conglomerados polimícticos que rellenan los valles. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la zona. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, así como rocas volcánicas, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

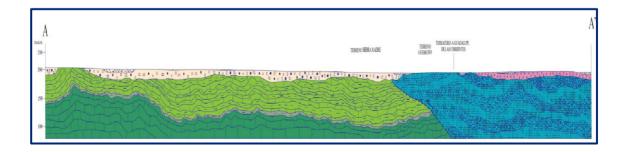
El predominio de sedimentos granulares y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, le confieren muy baja permeabilidad al acuífero, dado que los bajos caudales que aporta sólo son suficientes para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

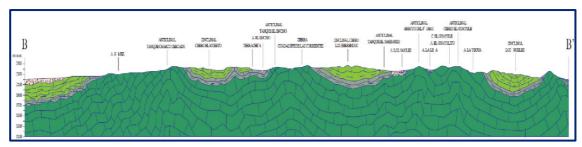
Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento, así como por rocas metamórficas y la secuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de calizas arcillosas y lutitas de las formaciones La Peña e Indidura (figura 3).

El espesor de este acuífero puede alcanzar 400 m. Debajo de este paquete de rocas existe un acuífero alojado en rocas calizas que puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas. Sus fronteras al flujo subterráneo y basamento están constituidas por las lutitas, limolitas y areniscas, que constituyen la Formación Nazas.



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B18, Estación La Colorada. Esc. 1:50,000 (SGM, 2009)





Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B28, Presa del Cedro. Esc. 1:50,000 (SGM, 2009) Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, así como la correlación con otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado.

La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría variada, depósitos lacustres y eólicos, así como conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos metros en el centro de los valles. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, y en menor proporción rocas volcánicas, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado, que puede presentar condiciones de **semiconfinamiento**, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero se analizó la información de 15 pruebas de bombeo realizadas en estudios previos. De acuerdo a la caracterización de la geología del subsuelo y a la interpretación de resultados, se puede afirmar que la mayoría de las pruebas muestran un acuífero libre alojado en un medio granular con efecto de drenaje diferido.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos varían de **0.7 x 10-4 a 4.7 x 10-3 m²/s**; si consideramos un espesor saturado promedio de 70 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **9.7 x 10-7 a 6.7x10-5 m/s (0.08 a 5.8 m/d).** Los valores más altos corresponden sedimentos clásticos de mayor granulometría o rocas volcánicas, en tanto que los más bajos se presentan en las lutitas, areniscas y conglomerados cementados. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. De acuerdo a la granulometría de los depósitos, para el balance de agua subterránea se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.01,** considerando los materiales aluviales arcillo arenosos y las rocas arcillosas de la Formación Caracol, que constituyen el acuífero en explotación.

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 2010-2015, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial. Debido a que la profundidad a los niveles del agua subterránea no muestra cambios importantes en su posición en los últimos años, únicamente se describe la piezometría más reciente.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2015 presentó valores que variaron, de manera general, de 10 a 80 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, excepto en la porción central donde la concentración de la extracción ha causado la profundización de los niveles del agua subterránea.

Los niveles estáticos someros, de 10 a 20 m, se presentan en la región central, en las inmediaciones del poblado Guadalupe de las Corrientes; así como en los valles localizados al sur y este de la superficie del acuífero. Los más profundos, de 70 a 80 m, se registraron en la porción central del valle, entre los poblados Estancia La Colorada y Estación Urbieta (figura 4).

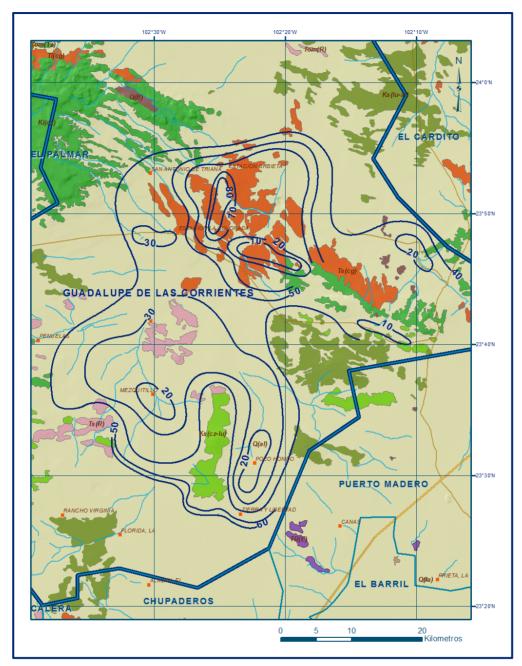


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

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 2,060 a 1,800 msnm, decreciendo desde la porción sur del acuífero hacia la planicie aluvial localizada en la región central mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo sur-norte, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental, para finalmente dirigirse hacia la laguna San Juan de Ahorcados.

Los valores más altos, de 2,000 a 2,060 msnm, se presentaron en la porción sur del acuífero, entre las comunidades Cañitas de Felipe Pescador y La Florida, en tanto que los más bajos, de 1,800 a 1,820 msnm, definen un cono de abatimiento formado en la porción central, al sur de la Laguna San Juan de Ahorcados (figura 5).

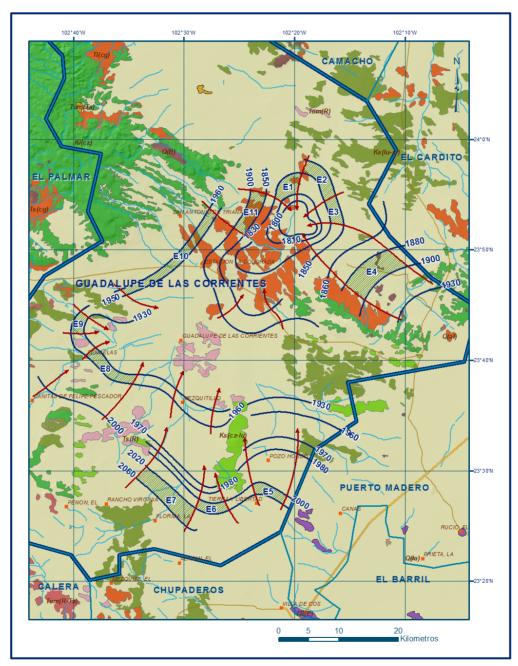


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2015 registró valores de abatimiento que variaron de 1 a 2 m, que representan un promedio anual

de 0.25 a 0.5 m, con valores puntuales de hasta 3 m que se observaron al este de Estación Urbieta y al noroeste de Tierra y Libertad, donde se concentra la extracción por bombeo; en estas zonas el abatimiento promedio anual es de 0.75 m (figura 6).

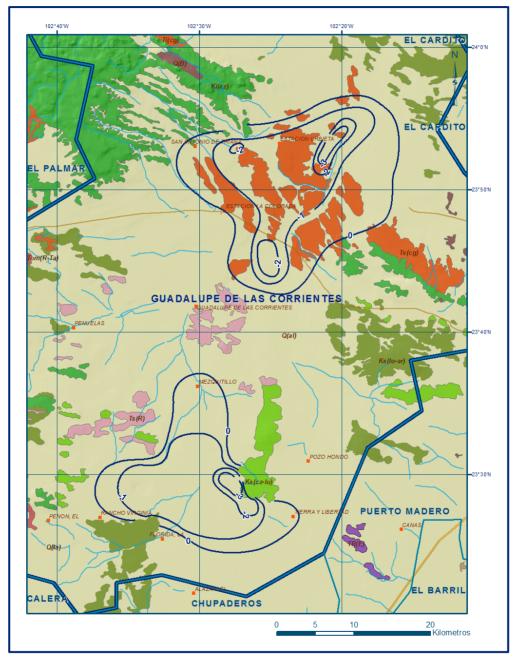


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2010-2015)

De manera general, en la mayor parte de la superficie de explotación del acuífero, no se registraron variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones in situ y de laboratorio incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), iones principales, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, flúor y dureza al calcio. Adicionalmente, en 4 muestras se determinaron las concentraciones de arsénico, mercurio y cianuro.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que, de manera general, los valores de concentración de STD variaba de 300 a 1106 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 ppm 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.

Sólo una muestra presentó un valor superior a 1000 mg/l (1106 mg/l) procedente de un pozo ubicado en la porción central del acuífero, confirmando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de manera general, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que se registraron valores inferiores y ligeramente superiores 2000 /S/cm; con valores extremos de 734 y 2295 /S/cm. Las temperaturas registradas varían de 21.5 a 30.5 °C y el pH varía de 7.7 a 8.6.

De las 10 muestras recolectadas, 8 registraron concentraciones de flúor superiores a los 1.5 mg/l que es el máximo permitido por la norma mexicana; no existe, geográficamente hablando, un patrón de ocurrencia de estos pozos con elevadas concentraciones de flúor, ya que se localizan en pozos emplazados tanto en material aluvial, como en conglomerados e ignimbritas.

Una de estas muestras presentó una concentración de cianuro de 0.08 mg/l, superior al límite máximo permisible que establece la NOM mencionada, que es de 0.07 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 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, enriquecidas en sodio hacia la parte baja del valle.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 10 muestras de agua, 2 se clasifican como C₂S₁, que representa agua de salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, 4 se clasifican como C₃S₁, que representa agua de salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable; ambas se consideran aptas para el uso agrícola y solo las de la segunda clasificación pueden requerir cultivos tolerantes a la salinidad; 2 se clasifican como C₃S₂.

Que representa agua de salinidad alta y contenido medio de sodio intercambiable que corresponde a agua que debe emplearse en cultivos tolerantes a la salinidad, en suelos con buen drenaje y requerir lavados periódicos; 1 se clasifica como C_3S_4 , que representa agua de salinidad alta y contenido muy alto de sodio intercambiable, y 1 más se clasifica como C_4S_2 , que representa agua de salinidad muy alta y contenido medio de sodio intercambiable; estas últimas no son recomendables para su uso en agricultura.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, realizado por la Dirección Local Zacatecas en el año 2009, se registraron un total de 586 obras que aprovechan el agua subterránea: 417 son pozos y 169 corresponden a norias. Del total de obras, 437 se consideran activas y 149 inactivas; de las obras activas 165 se destinan al uso agrícola, 36 para uso público-urbano, 24 más para uso doméstico y 212 para uso pecuario.

El volumen de extracción asciende a **34.3 hm³ anuales**, de los cuales 32.9 hm³ (95.9 %) se destinan al uso agrícola, 1.2 hm³ (3.5%) para uso público-urbano, 0.2 hm³ (0.6%) para usos pecuario y doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2010-2015, en una superficie de **710 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:

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 las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

Para este caso, debido a que el volumen para uso público-urbano es pequeño, para fines del balance de agua subterránea únicamente se considera la infiltración de los excedentes de riego 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 (ΔV), así como las entradas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Rr: Recarga incidental por retornos de riego

B: Bombeo

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

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

$$Rv = B + \Delta V(S) - Eh - Rr$$
 (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.

Para el cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2015, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

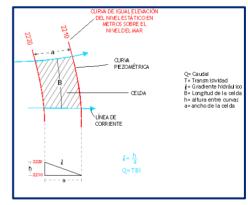
Donde:

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 definidas. En la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **17.1 hm³/año**.

CELDA	LONGITUD B	ANCHO a	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m²/s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
E1	4440	3755	20	0.0053	0.0012	0.0284	0.9
E2	7855	2220	20	0.0090	0.0010	0.0708	2.2
E3	4780	1880	20	0.0106	0.0010	0.0509	16
E4	9220	3415	20	0.0059	0.0015	0.0810	2.6
E5	5635	3245	20	0.0062	0.0015	0.0521	16
E6	5465	1705	20	0.0117	0.0012	0.0769	2.4
E7	11950	3415	40	0.0117	£000.0	0.0420	13
E8	10585	2560	30	0.0117	0.0003	0.0372	12
E9	4095	2730	30	0.0110	E000.0	0.0135	0.4
E 10	18780	1880	10	0.0053	0.0003	0.0300	0.9
E11	9220	2220	50	0.0225	0.0003	0.0623	2.0
						TOTAL	17.1

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 son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, en este acuífero y otros vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado en cada zona.

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 baja en el subsuelo. De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 32.9 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 1.6 hm³ anuales. Por lo tanto, **Rr = 1.6 hm³.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente mediante bombeo (B).

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 **34.3 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento (\(\Delta VS \)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2010-2015 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.01, 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)

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo 2010-2015 es de -7.4 hm³, por lo que el promedio anual es de – 1.5 hm³. Por lo tanto, $\Delta V(S) = -1.5$ hm³ anuales.

Abatimiento ΔV(S) Evolución (m) medio (m) Área (km²) Sy (hm³/año) 0a-1 -0.5 368.4 0.01 -1.8 -1 a -2 -1.5 298.3 0.01 -4.5 -2 -2 11.2 0.01 -0.2 -3 a -2 -2.5 21.1 0.01 -0.5 11.0 0.01 -0.3 Área de balance 710.0 **TOTAL** -7.4 Promedio anual -1.5

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2010-2015)

Solución de la ecuación de balance

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

Rv = B +
$$\Delta$$
V(S) – Eh – Rr
Rv = 34.3 - 1.5 – 17.1 – 1.6
Rv = 14.1 hm³ anuales

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	=
ANUAL DE AGUA DEL	
SUBSUELO EN UN	
ACUÍFERO	

RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL DESCARGA . NATURAL COMPROMETIDA

EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 **32.8 hm³/año**, de cuales 31.2 hm³ son recarga natural y 1.6 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 no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto **DNC = 0.0 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 (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 **42,802,299** 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 = 32.8 - 0.0 - 42.802299 DMA = -10.002299 hm³/año.

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **10,002,299 m³ anuales.**

9 BIBLIOGRAFÍA.

Comisión Nacional del Agua. 2003. Determinación de la Disponibilidad de Agua Subterránea en el Acuífero Guadalupe de las Corrientes, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico y de Calidad del Agua en los Acuíferos de: Guadalupe de las Corrientes, Puerto Madero, Villa Hidalgo, Pinos y Espíritu Santo. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C.