



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CEDROS (3218), ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	8
3.1	Provincia fisiográfica.....	8
3.2	Clima.....	9
3.3	Hidrografía.....	10
3.4	Geomorfología.....	11
4	GEOLOGÍA.....	11
4.1	Estratigrafía.....	12
4.2	Geología estructural.....	20
4.3	Geología del subsuelo.....	22
5	HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1	Tipo de acuífero.....	24
5.2	Parámetros hidráulicos.....	24
5.1.	Piezometría	25
5.3	Comportamiento hidráulico.....	25
5.3.1	Profundidad del nivel estático.....	25
5.3.2	Elevación del nivel estático.....	26
5.3.3	Evolución del nivel estático.....	27
5.4	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	28
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	29
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	30
7.1	Entradas.....	30
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	31
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	31
7.2	Salidas.....	33
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	33
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	33
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	33
8	DISPONIBILIDAD.....	34
8.1	Recarga total media anual (R).....	35
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	35
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	35
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	36
9	BIBLIOGRAFÍA.....	37

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 Cedros, definido con la clave 3218 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo norte del estado de Zacatecas, en el límite con los estados de Coahuila y Durango, entre los paralelos 24°16'47" y 25°07'31" de latitud norte y entre los meridianos 101°26'04" y 102°40'19" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 5,108 km².

Limita al norte con el acuífero Saltillo Sur, del estado de Coahuila; al este con el acuífero Guadalupe Garzarón; al sur con El Cardito; al suroeste y oeste con Camacho, todos ellos

del estado de Zacatecas; al noroeste con los acuíferos Oriente Aguanaval y Principal Región Lagunera, pertenecientes a los estados de Durango y Coahuila, respectivamente (figura 1). Geopolíticamente, comprende la totalidad del municipio de Melchor Ocampo y de manera parcial a Mazapil.

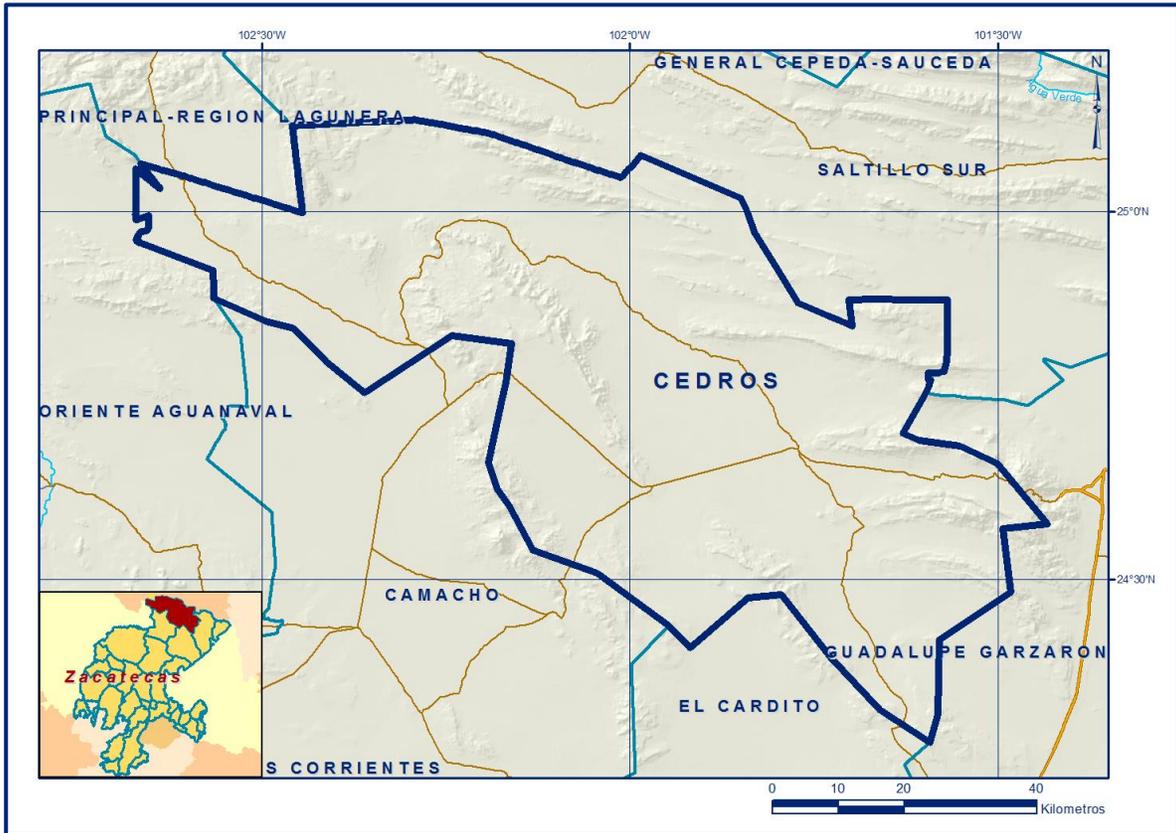


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 3218 CEDROS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	39	516	25	3	51.1	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	102	27	30.8	25	6	58.0	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	101	35	54.3	24	45	13.0	
4	101	37	47.4	24	41	56.0	
5	101	36	25.1	24	41	21.0	
6	101	33	7.4	24	40	53.9	
7	101	30	5.3	24	39	29.8	
8	101	26	2.6	24	34	33.3	
9	101	29	37.8	24	34	11.2	
10	101	28	57.8	24	28	59.5	
11	101	34	48.1	24	25	6.4	
12	101	34	55.0	24	19	0.9	
13	101	35	36.3	24	16	45.8	
14	101	39	40.5	24	19	25.8	
15	101	43	39.1	24	23	42.3	
16	101	47	40.4	24	28	48.5	
17	101	50	23.5	24	28	30.7	
18	101	55	5.9	24	24	27.8	
19	101	56	53.5	24	26	15.4	
20	102	2	39.7	24	30	34.7	
21	102	7	54.1	24	32	23.6	
22	102	9	51.4	24	36	2.9	
23	102	10	50.7	24	37	25.7	
24	102	11	33.4	24	39	32.6	
25	102	10	30.5	24	44	21.3	
26	102	10	7.9	24	46	4.3	
27	102	9	40.3	24	49	13.2	
28	102	14	30.0	24	49	53.2	
29	102	21	37.5	24	45	13.2	
30	102	24	45.4	24	47	43.2	
31	102	27	22.3	24	50	27.0	
32	102	29	40.2	24	51	15	
33	102	33	54.5	24	52	55.2	DEL 33 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	102	39	516	25	3	51.1	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cedros pertenece al Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte, al Consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval, instalado el 1 de diciembre de 1998 y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Zacatecas.

Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios señalados”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de agosto de 1988.

Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

El uso principal del agua subterránea es el industrial. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la región que comprende el territorio que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA IXTLERA DE ZACATECAS, elaborado en 1971 por INGESA para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Su objetivo fue investigar las características químicas del agua subterránea de la región, y de acuerdo con ellas planear su uso racional. Aporta información de pruebas de bombeo realizadas en la zona.

Entre los aspectos relevantes concluye que el Bolsón de Cedros es uno de los dos lugares donde es posible desarrollar, aunque en forma limitada, la agricultura convencional mediante el riego por bombeo en una superficie de entre 1000 y 1500 hectáreas.

Finalmente se recomienda impulsar al máximo la explotación de sales industriales como el sulfato de sodio, carbonato de sodio y sales de potasio.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE GUADALUPE GARZARÓN, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado en 1980 por Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos, S.A., (EGEOCISA), para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Fue realizado en una superficie de 7,500 km² en la región de Guadalupe Garzarón y consistió en la realización de censos de aprovechamientos hidráulicos, obtención de muestras de agua y roca, análisis físico-químicos, así como recorridos geohidrológicos de campo.

Entre los aspectos relevantes recomienda incrementar el número de perforaciones en el Bolsón de Cedros, debido a que la permeabilidad, niveles estáticos y calidad del agua eran aceptables. Propone efectuar perforaciones exploratorias hacia los flancos de las sierras El Ratón y Guadalupe, a profundidades del orden de 200 m.

ESTUDIO DE PROSPECCION GEOHIDROÓGICA Y EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LAS ZONAS MARGINADAS DEL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado en 1990 por Exploraciones y Estudios Geológicos, Geotécnicos y Geohidrológicos, EXYCO, S.A., para la Comisión Nacional del Agua. En un área aproximada de 6,000 km², se realizaron actividades de verificación y muestreo geológico de campo, secciones geológicas, censo de aprovechamientos hidráulicos; así como toma de muestras de agua para su análisis físico-químico.

Se cartografiaron 19 unidades litológicas, de las cuales 7 son las que revisten mayor importancia desde el punto de vista geohidrológico. La tectónica del lugar proporciona un complejo arreglo geológico-estructural que limita a la zona en grandes bloques de comportamiento hidrogeológico diferente. Recomienda programar recorridos de nivelación topográfica.

ESTUDIO REGIONAL DE EVALUACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL ACUÍFERO CEDROS, EN EL MUNICIPIO DE MAZAPIL, ESTADO DE ZACATECAS, realizado por la Universidad de Sonora, para M³ Mexicana S. de R. L. de C. V., en 2004. En este estudio se definieron las características físicas del medio saturado y de las unidades de roca que actúan como medio impermeable, identificando unidades hidrogeológicas. Se determinaron los parámetros hidráulicos y la geometría del acuífero en las zonas de interés, así como su capacidad hidráulica. Asimismo, se definieron las condiciones físicas y químicas del agua, interpretando sus relaciones hidrogeoquímicas y calidad del agua.

Se realizó un balance hidrometeorológico y con base en él, se determinó el volumen potencial para recarga. Mediante el balance de aguas subterráneas calcula una recarga total media anual de 10.1 hm³ anuales, en tanto que el valor estimado de la extracción era de 6.6 hm³ anuales.

ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y EVALUACION INTEGRAL DEL ACUIFERO ADMINISTRATIVO CEDROS, EN EL MUNICIPIO DE MAZAPIL, ZACATECAS, realizado en 2006 por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente S.A. de C.V. (IDEAS), para Minera Peñasquito, S.A. de C.V.

Los objetivos de estudios fueron los siguientes: Verificar la existencia de un acuífero profundo en rocas fisuradas, y determinar los parámetros hidráulicos utilizando los pozos exploratorios para este propósito; determinar los parámetros hidráulicos que se utilizaron en la modelación hidrodinámica y para definir el comportamiento del acuífero, describir la hidroestratigrafía del acuífero con la información litológica del programa de barrenos de condensación y los pozos de exploración-laboreo, definir el modelo hidrogeológico tridimensional del área de mina, identificar las condiciones físicas y químicas del agua e interpretar sus relaciones hidrogeoquímicas y calidad del agua que es reflejo del área de influencia de zonas mineralizadas del área de mina, y construir el modelo de simulación numérica que permita observar el comportamiento del acuífero en diversos escenarios.

La simulación de flujo del agua subterránea se llevó a cabo para el entorno de la unidad minera, ubicada en el valle de Mazapil, proyectando su explotación al año 2010.

ESTUDIO HIDROGEOLOGICO CONSECUTIVO DEL ACUIFERO CEDROS, elaborado en 2007 por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente S.A. de C.V. (IDEAS), para Minera Peñasquito, S.A. de C.V.

Entre sus actividades más importantes destacan el censo de aprovechamientos, la prospección geofísica, la exploración hidrogeológica mediante la perforación de barrenos y la ejecución de pruebas de bombeo.

EVALUACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA DE UNA MINA A CIELO ABIERTO MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN, UTILIZANDO DIVERSOS ENFOQUES DE MODELACIÓN BASADOS EN LOS ATRIBUTOS GEOLÓGICOS DEL ACUÍFERO. M. en C. José Enrique Herrera Salazar, Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua. Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería-Centro Interamericano de Recursos del Agua, 2014. Su objetivo fue caracterizar el comportamiento del flujo del agua subterránea durante la etapa de producción de una mina alojada en un acuífero fracturado constituido por rocas calcáreo-arcillosas, rocas intrusivas y brechas, mediante la elaboración de un modelo de simulación, para la definición de estrategias adecuada para el control del desagüe.

Aporta información de conductividad hidráulica obtenida a partir de pruebas de bombeo, asociadas a las diferentes unidades geológicas que conforman el subsuelo en el área de la mina Peñasquito, que se conoce mediante los barrenos de exploración, los cortes litológicos de pozos y las exploraciones geofísicas.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, HIDROMETRÍA DE LAS EXTRACCIONES Y CALIDAD DEL AGUA EN EL ACUÍFERO CEDROS, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2016-2018.

Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, la hidrometría de las extracciones y resultados de análisis fisicoquímicos practicados a muestras de agua subterránea.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica totalmente dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental. 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 la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, Subprovincia Sierras Transversales.

La Sierra Madre Oriental está orientada en sentido norte-sur y noroeste-sureste, que muestra una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey. Representa un conjunto de sierras en las que afloran secuencias mesozoicas plegadas de rocas sedimentarias marinas del Cretácico y Jurásico Superior, entre las que predominan las calizas, areniscas y secuencias arcillosas.

El plegamiento se manifiesta de múltiples maneras, pero su forma más notable es la que produce topofomas onduladas y paralelas, en donde las partes topográficamente más altas, corresponden con anticlinales y las zonas bajas a sinclinales, cuando las formaciones son resistentes a la erosión.

La flexión de las rocas en las crestas de los pliegues, ocasionó extensión con el correspondiente fracturamiento, haciéndolas más susceptibles a los procesos erosivos. Cuando las estructuras mayores se encuentran erosionadas en sus núcleos sólo quedan flancos residuales de los anticlinales, con un valle al centro, denominadas "potreros".

La Subprovincia de las Sierras Transversales está conformada de sierras orientadas en forma paralela a los cuerpos centrales de la Sierra Madre Oriental, separadas unas de otras por llanuras más o menos amplias.

Dentro del estado de Zacatecas tiene una extensión de 11,386 km² que representan el 14.71% de la superficie total de la entidad. Se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, adaptada por Enriqueta García a las condiciones de México, en el territorio que cubre el acuífero predomina el clima árido (B), con algunas variantes de acuerdo con la topografía. En los valles el clima dominante es BSohw árido semicálido y BWhw muy árido semicálido, en los que la temperatura media varía entre 18 y 22 °C, temperatura del mes más frío es menor de 18 °C y del mes más cálido mayor a 22 °C, con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total.

En las regiones de transición se registra clima BSokw árido templado, con temperatura media anual entre 12y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual.

En las zonas de sierras el clima es BS1kw y BS1k(x') semiárido templado, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% y mayor al 18% del total anual, respectivamente.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 15 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Estación Camacho, Caopas, Cedros, Concepción del Oro, Gruñidora, Nuevo Mercurio, San Tiburcio, Mazapil, Ejido San Rafael, Nuevo Tampico, Melchor Ocampo, San Jerónimo, San Juan de Guadalupe, Bajío de Ahuichila y Tanque Aguilereño.

Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1951-2010 y el más corto 2006-2017, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de 339.0 mm, 17.9 °C y 2089.2 mm, respectivamente.

Los valores extremos de temperatura media anual son: máxima de 28°C, registrada en agosto, y una mínima de 2°C en enero. La temperatura promedio mensual mayor es la del mes de julio, con 22 °C, registrada en junio, y la menor de 12 °C, en enero.

La región presenta condición de canícula y heladas en un rango de 20 a 60 días por año. La precipitación promedio mensual máxima se registra en septiembre, donde se promedia una lámina de 60 mm, la precipitación promedio menor corresponde al mes de febrero con un valor de 9.1 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero Cedros es una cuenca de forma irregular que pertenece a la Región Hidrológica 36 "Nazas Aguanaval", Subregión Hidrológica "El Salado", cuenca "Laguna de Mayrán y Viesca"; Subcuenca Laguna de Viesca, con dirección de sus corrientes hacia el poniente; ambos sistemas son arréicos. La Laguna de Viesca guarda cierta similitud con la Laguna de Mayrán ya que cuenta con un alimentador principal, en el caso de la Laguna de Mayrán es el Río Nazas y en la Laguna de Viesca es el Río Aguanaval que es aprovechado mediante presas, no así la Laguna de Mayrán que se encuentra en proceso avanzado de desecación.

El valle de Mazapil aporta importantes recursos hidráulicos en su salida, hacia el bolsón de Cedros.

Las condiciones climáticas, topográficas y geológicas del valle de Mazapil, generan un escurrimiento superficial en el Arroyo Grande estimado de 16.5 millones de m³ anuales, a la altura donde desemboca al Bolsón de Cedros, donde desaparece físicamente al infiltrarse en las partes bajas.

La dirección de flujo superficial se encuentra controlada orográficamente desde las sierras altas, con elevaciones de 3000 msnm, hacia las partes más bajas, controlado por las pendientes suaves de los valles de Mazapil, Melchor Ocampo, El Jagüey, Santa Rosa y principalmente el de Cedros. Los cuatro primeros tienen una dirección preferencial este-oeste, conectándose al flujo principal del valle de Cedros que tiene una dirección sureste-noroeste.

Aunado a él están los escurrimientos de San Rafael, al oeste, y al sur Sábana Grande, que en su totalidad desembocan fuera del límite del acuífero Cedros, hacia el Bajío Los Llanos, cerca del poblado de Viesca, en el estado de Coahuila.

Los arroyos existentes son intermitentes, algunos de estos son: Escobillas, La Bolsa, Lagunilla y Grande.

No existen obras hidráulicas importantes para el almacenamiento de las aguas pluviales, sólo se cuenta con algunas represas y bordos que satisfacen las necesidades básicas de la región, principalmente para uso de abrevadero y en ocasiones, debido a la escasez, para consumo humano.

3.4 Geomorfología

La morfología de la cuenca es producto de patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de ahí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de sus corrientes principales se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los ríos como zonas de debilidad.

Se pueden distinguir cuatro unidades geomorfológicas: sierras anticlinales calcáreas, valles sinclinales intermontanos, planicies y lomeríos.

La mayor parte del área comprendida por el acuífero, corresponde a una serie de sierras anticlinales alargadas cuyos flancos presentan pendientes que varían de medias a fuertes y se encuentran disectadas por arroyos con dirección principalmente perpendicular a las sierras, formando acantilados espectaculares. Estas sierras están constituidas por rocas calcáreas del Cretácico y Jurásico que forman parte de la Sierra Madre Oriental. Se elevan de 2,200 a 2,900 msnm y hasta 900 m sobre el nivel medio de los valles.

Los pliegues sinclinales corresponden a angostos valles alargados, llamados también valles estructurales, que se presentan entre los plegamientos de la Sierra Madre Oriental con una orientación este-oeste y noroeste-sureste.

En ellos escurren algunos arroyos que descienden de las sierras y se pierden por infiltración al subsuelo. Las planicies representan extensas superficies planas limitadas por los conjuntos de sierras plegadas que forman anticlinales y sinclinales, que se encuentran a una altitud promedio de 1,900 msnm. Los lomeríos presentan formas suaves y redondeadas debido a que las rocas que las constituyen son lutitas y areniscas, poco resistentes a la erosión, con alturas promedio entre 50 y 100 m, ocasionalmente hasta 200 m, con escarpes de poca altura.

4 GEOLOGÍA

El área de estudio forma parte del cinturón de pliegues y cabalgaduras de la provincia geológica transversal de la Sierra Madre Oriental, entre Monterrey y Torreón. Está constituida por rocas sedimentarias marinas de composición calcáreo-areno-arcillosas, con edades del Jurásico Superior al Cretácico y depósitos de aluvión del Holoceno (figura 2). La cobertura sedimentaria fue plegada por la Orogenia Laramide a fines del Cretácico y principio del Terciario.

Esta es una orogenia donde el basamento no fue plegado o deformado, de tipo decollement, con desprendimiento y deslizamiento en la base de la secuencia sedimentaria, constituida por las formaciones con yesos y lutitas del Jurásico Superior. Los elementos paleogeográficos que prevalecieron durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior fueron la paleo-isla de Coahuila, la paleo-península de Tamaulipas, el paleo-golfo de Sabinas y la paleo-cuenca Central de México.

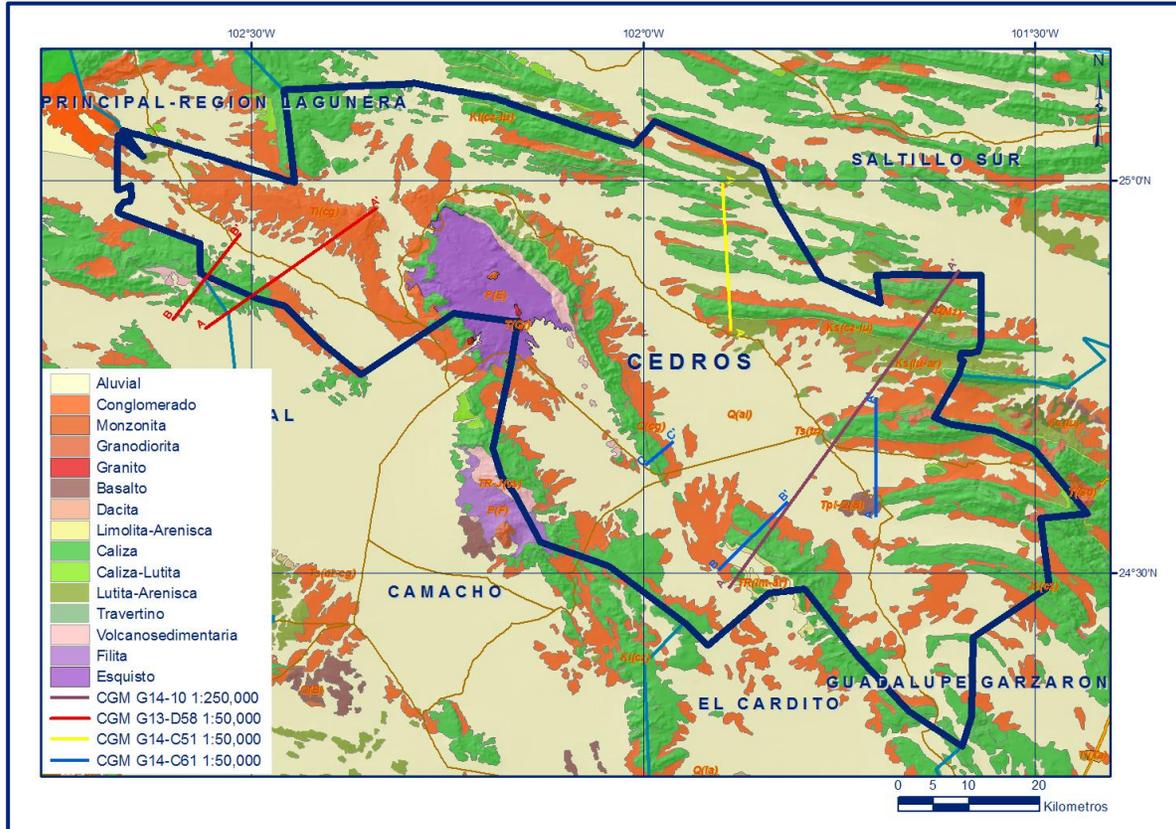


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La geología que cubre el área de estudio está compuesta por rocas sedimentarias tanto marinas como continentales, volcanosedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, y metamórficas; cuyo rango de edad varía del Triásico al Cuaternario. A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas:

TRIÁSICO SUPERIOR

Formación Taray

Aflora principalmente en la sierra de Teyra, formando un conjunto de rocas bandeadas, constituidas de grauvacas y filitas, con interestratos de novaculita.

Su base está constituida por filitas de color café claro y la parte superior por novaculitas, interestratificadas con dolomitas y grauvacas.

TRIÁSICO

Formación Caopas

Término propuesto formalmente por Rogers et al.(1961) para designar a una roca esquistosa que subyace a la Caliza Zuloaga en las proximidades del Rancho Caopas, localizado en la porción occidental de la Sierra de San Julián en el NW del estado de Zacatecas. En algunas localidades está intensamente deformada.

Está compuesta de una roca dura, silícea de color verdoso que intemperiza a un color característico pardo amarillento que la hace fácilmente diferenciable. Contiene abundante cuarzo en forma de cristales o como vetillas. Su contacto superior con la Formación Rodeo es por falla. Cerca del poblado Caopas, está cubierta indistintamente por la Formación Zuloaga o por la Formación Nazas

Formación Rodeo

Rogers et al. (1961), propusieron el nombre Esquistos Rodeo para una unidad que varía de filitas a esquistos, que presentan colores que varían de púrpura, violeta, violeta grisáceo, gris amarillento y verde, con algunas capas muy alteradas de material metavolcánico, que sobreyacen al Esquisto Caopas. Sus mejores afloramientos se localizan en el poblado El Rodeo, en la Sierra de San Julián, Zacatecas.

El contacto superior con la Formación Nazas es transicional y concordante

TRIÁSICO-JURÁSICO

Formación Nazas

Nombre establecido por Pantoja A., (1963) para una secuencia de tobas, lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo intercaladas con lavas, que aflora en la región cercana a Villa Juárez, Durango. Córdoba (1965), lo utiliza para denominar una secuencia de conglomerado, lutita y limolita de color verde y rojo, que aflora en el flanco occidental de las sierras de San Julián, Teyra y Ramírez.

Está constituida por una alternancia de rocas sedimentarias, constituida por limolitas, lutitas y areniscas; intercaladas con rocas volcánicas de composición ácida a intermedia representadas por riolitas, ignimbritas, dacitas, traquitas, andesitas y tobas; intrusionadas por el granito milonitizado Caopas que presenta diferenciaciones a pórfido andesítico y foliación de aspecto esquistoso a gnéisico.

Depositada al mismo tiempo, se encuentra una unidad vulcanosedimentaria perteneciente a la misma Formación Nazas, de edad Triásico Superior al Jurásico Inferior, que aflora en la parte central-oeste del acuífero.

La cima de esta formación se encuentra en contacto discordante con el conglomerado La Joya. Se correlaciona con los lechos rojos de la Formación Huizachal y aflora en la Sierra de San Julián, del Teyra y en el Cerro de Europa. Su contacto inferior con la Formación Rodeo es nítido y concordante, y el contacto superior con la Formación Zuloaga es brusco y concordante. En algunas localidades se observa claramente el depósito transgresivo de las calizas de la Formación Zuloaga, con la cual puede tener un contacto discordante angular.

JURÁSICO

Formación La Joya

Consiste de conglomerados derivados de la Formación Nazas, areniscas, areniscas conglomeráticas, lutitas y limolitas de color rojo, ocasionalmente de color verde, de origen continental. Aflora en la Sierra Madre Oriental y en el subsuelo se encuentra distribuida en la Planicie Costera del Golfo. En su localidad tipo tiene más de 1200 m de espesor. Sus contactos superior e inferior con las formaciones Nazas y Zuloaga, respectivamente, son discordantes. Se le asigna una edad correspondiente al Jurásico Superior.

Formación Zuloaga

Fue originalmente estudiada por Burckhardt (1906, 1930) en la región septentrional del centro de la república, refiriéndose a ella como "Caliza con Nerineas" y posteriormente fue definida como Formación Zuloaga por Imlay en 1938, designando como localidad tipo a la Sierra de Sombrerete, ubicada al norte de Melchor Ocampo, Zacatecas.

Consiste de calizas estratificadas en capas gruesas con nódulos de pedernal, ocasionales bivalvos y gasterópodos, en ocasiones con capas con clásticos angulares, así como estratos arcillosos, cuyos afloramientos constituye el núcleo de los anticlinales.

Descansa discordantemente sobre el conglomerado La Joya y a su vez subyace concordantemente a la Formación La Caja. Por su disposición estratigráfica se le ha asignado una edad Jurásico Superior (Oxfordiano-Tithoniano).

Formación La Caja

Definida formalmente por Imlay (1938), designando como localidad tipo a la Vereda del Quemado, situada en el flanco meridional de la Sierra La Caja, localizada al norte de Mazapil, Zacatecas. Tiene amplia distribución en la región norte del centro de México; en el área de Saltillo no presenta buenos afloramientos debido a su escaso espesor y a que por su constitución litológica es fácilmente erosionable, estando generalmente cubierta por aluvión y material detrítico.

De manera general, está constituida por lutitas, limolitas, calizas y calizas fosfatadas, cuyos espesores varían de delgados a medios y ocasionalmente laminares. Presenta concreciones calcáreas de colores gris y gris oscuro a todo lo ancho; en algunas localidades contiene amonitas y pelecípodos. Subyace y sobreyace de manera concordante a las formaciones Taraises y Zuloaga, respectivamente. Por su contenido fósil, Burckhardt e Imlay le asignan una edad Kimmeridgiano-Tithoniano. La abundancia de amonitas en esta formación sugiere un depósito de ambiente infranerítico.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Taraises

Fue definida por Imlay para referirse a una sección calcárea y calcáreo-arcillosa, limitada en la parte inferior por la Formación La Caja o La Casita y en la parte superior por la Caliza Cupido. Designando como localidad tipo el Cañón de Taraises, ubicado en la porción occidental de la Sierra de Parras, donde la dividió en dos miembros: El inferior conformado por capas gruesas de calizas de color gris, interestratificadas con areniscas, y el superior constituido por calizas arcillosas de color gris, nodulares y con presencia de amonitas en la parte basal.

Presenta color gris claro que intemperiza en pardo amarillento, dispuesta en capas delgadas y medias de 20 a 50 cm de espesor, contiene nódulos de hematita y óxidos diseminados. Su espesor estimado es de 350 a 400 m, y su edad es Cretácico Inferior (Berriasiano-Hauteriviano). Subyace concordantemente a la Formación Cupido y descansa de igual forma sobre la Formación La Caja.

Formación Cupido

Término definido por Imlay para una sección calcárea que descansa sobre la Formación Taraises y subyace a la Formación La Peña, cuya localidad tipo es la pared norte del Cañón del Mimbres, localizado en la porción media de la Sierra de Parras, aproximadamente a 60 km al SE de la población del mismo nombre, en el estado de Coahuila.

Está constituida por calizas con estratificación mediana y gruesa, que presentan coloración en tonos de gris, y lentes y nódulos de pedernal más abundantes que la Formación Taraises, cuyo contacto no es fácil distinguir por ser transicional. Las concreciones de pirita son más abundantes y más grandes que en la unidad subyacente; en cambio, las intercalaciones de lutitas son muy escasas y se presentan en capas muy delgadas.

Su depósito ocurrió durante el Hauteriviano Tardío al Aptiano Temprano, descansando concordantemente sobre sedimentos arcilloso-calcáreos (Formación Taraises) y subyaciendo de la misma manera a las calizas y lutitas de la Formación La Peña.

Formación La Peña

Nombre fue introducido por Imlay (1936) para distinguir a un cuerpo compuesto por dos miembros: El inferior constituido por calizas y el superior por lutitas y calizas, que estratigráficamente se ubica entre la Caliza Cupido y la Caliza Aurora. Su localidad tipo se ubica en el flanco norte de la Sierra de Taraises, a 4.8 km al E-SE de la Hacienda La Peña, localizada en el extremo sur del estado de Coahuila. Humphrey (1949), propuso que restringiera al miembro superior y el inferior a la Formación Cupido. Es una unidad de amplia distribución en el NE y E de México y un horizonte índice de referencia estratigráfica, debido a su contraste litológico marcado con las formaciones que la limitan. También se caracteriza por contener intercalaciones de capas delgadas de argilitas de coloración que varía de amarillenta a gris.

Sus contactos inferior y superior con la Formación Cupido y Aurora, respectivamente, son bruscos y concordantes, aunque ligeramente transicional con ésta última. Rogers et al., (1961), le asignan edad Aptiano-Albiano. Su contenido fósil y litología sugieren un depósito de aguas de mediana profundidad.

Formación Aurora

Humphrey (1956) propuso que el término Formación Aurora fuera modificado para incluir todas las rocas carbonatadas del NE de México ubicadas estratigráficamente entre la Formación La Peña o sus equivalentes, abajo, y la Formación Cuesta del Cura y otros equivalentes del Grupo Washita o la Formación Kiamichi arriba. Consta de calizas con estratificación mediana y gruesa, de color gris y gris oscuro, con intercalaciones de calizas laminares y delgadas bandas de pedernal. Hacia su cima presenta estratos gruesos de calizas conglomeráticas, con fragmentos más grandes hacia la base.

Por su contenido faunístico y por sus características litológicas, se infiere que estas calizas se depositaron en un ambiente somero con facies arrecifales. Por su posición estratigráfica y determinaciones paleontológicas, se le asigna una edad correspondiente al Albiano Medio.

Formación Cuesta del Cura

Originalmente descrita por Imlay (1936) al referirse a los afloramientos de calizas delgadas ondulantes con bandas de pedernal negro que afloran a 6.4 km al W de Parras, Coahuila, área en donde se encuentra entre las formaciones Aurora e Indidura. Consta de calizas con estratificación laminar, delgada y mediana, de color gris claro a negro, con intercalaciones de pedernal negro y algunas concreciones de pirita. Su característica distintiva es la estratificación ondulada y abundantes marcas de oleaje. Sus contactos inferior y superior con las formaciones Aurora e Indidura, respectivamente, son concordantes y bruscos. Por su contenido faunístico fósil, su edad abarca desde el Albiano Medio hasta el Cenomaniano Inferior.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Fue estudiada por primera vez por Emil Bosé en 1906 en la Sierra de Parras y posteriormente definida por Kelly en 1936 en su localidad tipo de Delicias Coahuila, específicamente en el afloramiento localizado en el flanco oriental del Cerro La Indidura, localizado aproximadamente a 8 km al norte de Tanque Toribio, en donde consiste de 30 m de lutitas y calizas resquebrajadas y calizas lajeadas. Está constituida por un paquete de calizas arcillosas y lutitas calcáreas con estratificación laminar y delgada, intercaladas con capas de calizas con estratificación que varía de delgada a gruesa, de color gris hasta parduzco.

Hacia la cima presenta lutitas de color gris oscuro muy fáciles de erosionar, por lo que tienden a formar ligeras depresiones en el terreno. Esta formación descansa de manera concordante sobre la Formación Cuesta del Cura, y contiene fósiles que le confieren una edad que data del Cretácico Superior, del Cenomaniano Tardío al Turoniano.

Formación Caracol

Fue descrita por Imlay (1937) como tobas desvitrificadas, lutita y caliza en menor proporción que sobreyacen a la Formación Indidura, en la parte media de la Sierra de Parras, Coahuila.

Consiste principalmente de una secuencia de capas de estratificación mediana a delgada de calizas y lutitas de color gris oscuro con bandas de pedernal de color gris a negro, que intemperizan a color amarillo ocre y rojizo. Su constitución litológica es muy variable debido a que posiblemente su depósito comprendió facies diferentes.

Se caracteriza por la presencia de calizas con lutitas; las calizas corresponden a micritas arcillosas recristalizadas de color gris claro, que en roca fresca presenta un color negro, textura wackestone y vetas de calcita. Por su posición estratigráfica se le ha determinado una edad que comprende del Coniaciano hasta el Santoniano.

Formación Parras

Definida por Imlay en 1936 para referirse a una secuencia de 1,200 m de lutitas carbonosas negras con escasas intercalaciones de areniscas. Está constituida por una litología muy homogénea de lutitas calcáreas y calizas arcillosas, estas últimas intercaladas en forma esporádica dentro de la secuencia arcillo-calcárea. Las lutitas son calcáreas de color negro a gris oscuro, estratificadas en capas delgadas y medianas.

Al intemperismo muestran un aspecto masivo debido a que la fractura astillosa o esquistosidad tipo lápiz, destruye los planos de estratificación. Se considera que la potencia de la secuencia arcillo-calcárea varía de 400 a 800 m y cubre de manera concordante y transicional a la Formación Indidura, por lo que es difícil precisar la zona de contacto entre ambas unidades. Su contacto superior es con los sedimentos continentales del Reciente por medio de discordancia angular.

TERCIARIO

Formación Ahuichila

Definida formalmente por Rogers (1981), en los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas. Es un depósito de tipo molasa continental que se acumuló después del plegamiento de la Sierra Madre Oriental, está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenita, calcilutita y de rocas volcánicas, en una matriz calcárea y limolítica; así como calizas, arcosas, calizas de agua dulce, tobas y otros materiales piroclásticos, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris a rojizo.

Sus afloramientos son escasos se localizan exclusivamente en las zonas de pie de monte. Rogers (op. cit) en su localidad tipo reporta un espesor de 305 m. Debido a su posición estratigráfica y su origen, se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente, generada por la Orogenia Laramide. Su edad corresponde al Eoceno y está asociada a las márgenes de bloques y fosas tectónicas.

Rocas volcánicas

Están representadas por brechas de composición riolítica de edad Oligoceno, basaltos y andesitas basálticas edad Mioceno que fueron emitidas en la etapa de vulcanismo que originó el campo volcánico Los Encinos.

Rocas intrusivas

Son de naturaleza plutónica e hipabisal, formando stocks de dimensiones moderadamente grandes y pequeños, asimismo existen pórfidos riolíticos, diques y diquestratos. Su composición varía de granodiorítica, diorítica y cuarzodiorítica. En algunas localidades es monzonítica y sienítica.

CUATERNARIO

Depósitos Aluviales

Cubren los valles y están constituidos por materiales granulares producto del intemperismo químico y mecánico de las rocas preexistentes y erosión de las partes topográficamente altas. Corresponden principalmente a conglomerados polimícticos mal consolidados y sedimentos de granulometría muy variada, desde arcillas, arenas y gravas hasta boleos y cantos rodados de calizas, que constituyen los piedemontes y los valles.

En las zonas cercanas a las sierras, predominan los cantos rodados, principalmente a lo largo de los arroyos intermitentes que los acarrearán en épocas de lluvias. Hacia las partes bajas de los valles, predominan las gravas y arenas a lo largo de incipientes cauces de inundación, donde solo corre agua superficial en tiempo de lluvias. En la mayor parte de los valles, se encuentran materiales aluviales finos, principalmente arcillas y en menor proporción arenas y gravas. Las arcillas y arenas finas, son también transportadas por el viento.

El espesor promedio total de estos materiales es de 10 a 30 m, pero puede alcanzar hasta 100 m en el centro de algunos valles. Se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades cretácicas, jurásicas o terciarias. Su depósito se

efectuó en un ambiente continental, generalmente formando parte de abanicos aluviales. Hacia los valles se depositaron materiales coluviales y aluviales, así como y depósitos lacustres y travertinos.

4.2 Geología estructural

Las estructuras predominantes en la región fueron generadas por esfuerzos compresivos de lo Orogenia Laramide mientras que las etapas de fallamiento distensivo durante el Terciario. Existen dos direcciones de estructuras principales; el primero con dirección NW-SE y el segundo NE-SW.

La forma arqueada de los pliegues se generó durante la Orogenia Laramide cuando las rocas del Mesozoico se deslizaron hacia el nororiente sobre las evaporitas y lutitas del Mesozoico inferior que fueron plegadas y cabalgadas contra y sobre las Islas de Coahuila y San Carlos, produciendo así una vergencia general de las estructuras hacia el norte y nororiente. La falla lateral izquierda San Tiburcio cruza la región de sureste a noroeste, con un rumbo NW-SE, en una longitud aproximada de 100 km.

La zona se ha dividido en tres fajas: faja de la sierra y valles, faja de sierras y llanuras y faja mineral, las cuales representan una sucesión progresiva de la deformación asociada en parte a fallamiento, enmarcado dentro del terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre (Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-10, escala 1:250,000. SGM, 2000).

En el área se distinguieron dos eventos de deformación; el primero pre-oxfordiano, que dio origen a la esquistosidad de las formaciones Taray, Rodeo y Caopas, asociada a la evolución del arco continental cordillerano. Asociada a la esquistosidad se desarrolla una lineación mineral.

El segundo evento de deformación se evidencia principalmente en el paquete sedimentario Cretácico, durante la Orogenia Laramide, originando una serie de pliegues anticlinales y sinclinales, generalmente asimétricos, desarrollando al mismo tiempo una gran cantidad de cabalgamientos con transporte tectónico al NE.

Este tipo de estructuras se manifiesta ampliamente en las sierras Yerbaniz, La Herradura. La Piedra Blanca, La Candelaria, San Julián, El Solitarios de Teyra y Guadalupe, en donde se observan apilamientos de cabalgaduras intraformacionales produciendo sierras de elevaciones considerables con fuertes pendientes.

El efecto de la Orogenia Laramide es claramente observable en el flanco oriental del anticlinal San Julián, que corresponde a un pliegue de fondo en compresión, en donde se desarrollaron cinco estructuras anticlinales, orientadas en dirección NE-SW, recostados al NE, es decir en forma oblicua a la estructura principal de la Sierra de San Julián y que se conoce como Cerro Las Mulas, Cerro Las Palomas, Cerro Las Tinajas, Cerro San Miguel y Cerro Jiménez.

En estas localidades es claramente observable las dos fases de deformación de la zona: abajo las rocas metamórficas foliadas y en la parte superior la cobertura mesozoica con la deformación laramídica, definiéndose claramente la zona de despegue ("Decollement") o zona de desplazamiento en la base de la Formación Zuloaga, quedando la Formación Nazas como tegumento (Carta Geológico-Minera Juan Aldama G13-12, escala 1:250,000. SGM, 1999).

Estructuralmente, el acuífero Cedros presenta dos patrones de estructuras que originan fosas tectónicas, el primero orientado NW-SE que corresponde a la falla San Tiburcio, en la parte central del acuífero; el otro patrón son los lineamientos este-oeste marcados por los sinclinales y anticlinales que ocupan la porción este, los cuales aportan su flujo hacia el centro del acuífero.

El área del acuífero Cedros se puede dividir en dos regiones principales que están marcadas por la tectónica y se evidencian por el lineamiento y posición de los afloramientos existentes. A la primera región pertenecen los sinclinales y anticlinales, localizados al oriente del acuífero, con ejes alineados en sentido este-oeste. La segunda zona se ubica en la porción occidental del acuífero y está integrada por los afloramientos de los sinclinales y anticlinales recumbentes. Estas dos regiones o márgenes están separadas por un lineamiento NW-SE que atraviesa el bolsón de Cedros.

Los sinclinales y anticlinales de la margen derecha forman las sierras y valles transversales en donde también se localiza el Valle de Mazapil, caracterizado por las rocas sedimentarias del Geosinclinal Mexicano. Estas rocas sedimentarias se encuentran cubiertas por depósitos aluviales cuyo espesor se incrementa hacia el oeste, internándose en el bolsón de Cedros.

El aluvión se encuentra descansando sobre la Formación Caracol que se considera el basamento del acuífero granular. Las rocas sedimentarias se encuentran fracturadas y plegadas y presentan condiciones favorables para constituir acuíferos, hecho que se

comprueba en las obras mineras. Esto es evidente también en las rocas aflorantes de la Sierra El Mascarón las cuales presentan manantiales que aportan agua al poblado Concepción del Oro.

Las rocas del Cretácico que están constituidas por calizas y rocas arcillosas correspondientes a las formaciones Cupido, La Peña, Zuloaga y Cuesta del Cura, las cuales se encuentran plegadas en anticlinales y sinclinales asimétricos, cortados en algunas partes por fallas orientadas NE-SW en la porción oriental del área.

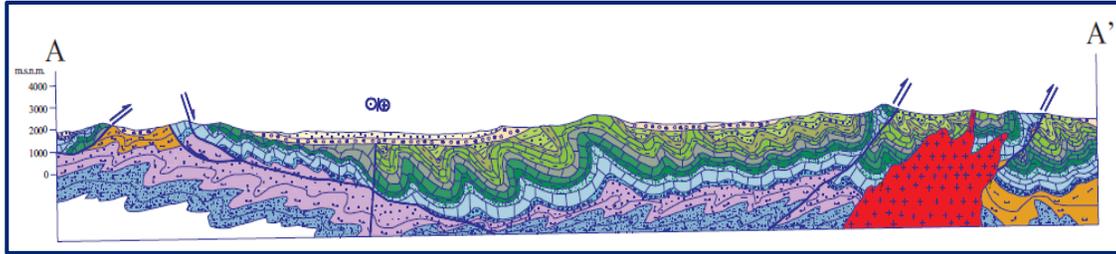
Por otra parte, las rocas que se encuentran afectadas por cuerpos ígneos intrusivos de composición pórfido andesítico, han sido deformadas, fracturadas y alteradas. Estas rocas se localizan en la parte occidental del área, acompañadas de rocas metamórficas compuestas de metagranitos (Caopas) y metavolcánicos (Nazas-Rodeo) de edad Triásico Superior.

4.3 Geología del subsuelo

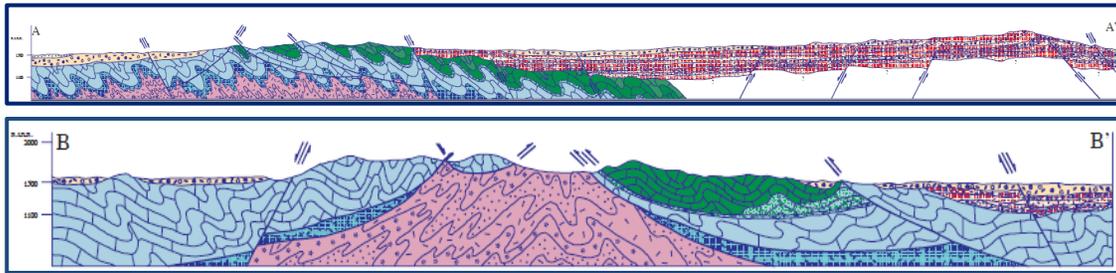
De acuerdo con la información geológica, geofísica y piezométrica recabada en el acuífero y por correlación con otros acuíferos vecinos, así como con la información obtenida de cortes litológicos de algunos pozos, es posible definir que en el subsuelo se presentan areniscas, lutitas, calizas sobreyacidas por depósitos aluviales y coluviales, así como de piedemonte hacia los flancos de las sierras que lo delimitan. El acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, por sedimentos aluviales y coluviales así como conglomerados y areniscas, que en algunos valles alcanza 400 m de espesor, producto de la erosión de las partes altas de las sierras, que han sido transportados por abanicos aluviales, por escurrimientos superficiales y por el viento para ser depositados en los cauces de los arroyos y las planicies.

La porción inferior está constituida por lutitas alteradas y fracturadas, que junto con la unidad superior forman un acuífero de baja permeabilidad y de reducida capacidad de almacenamiento, que se explota para cubrir las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las secuencias de calizas cretácicas conforman un acuífero de permeabilidad alta, que en acuíferos vecinos es explotado en las estructuras anticlinales con buenos caudales. Los acuíferos alojados en las rocas calcáreas presentan condiciones de semiconfinamiento y confinamiento debido a que se encuentran intercaladas con capas de lutitas y limolitas. En el área del acuífero se ha identificado su presencia al este del poblado de Mazapil, en las inmediaciones de Salaverna, en donde el espesor aluvial es muy pequeño, y en la mina Peñasquito.

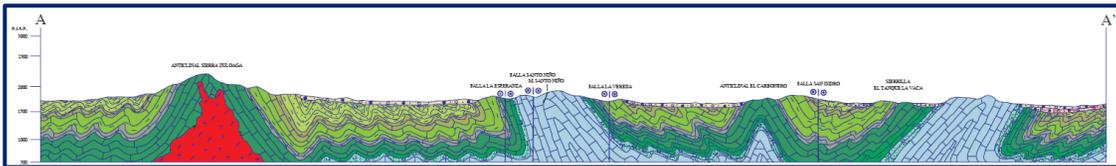
En la figura 3 se presentan secciones geológicas esquemáticas que muestran la compleja geología estructural de la región y la capa de sedimentos aluviales y coluviales que se depositaron en los valles anticlinales.



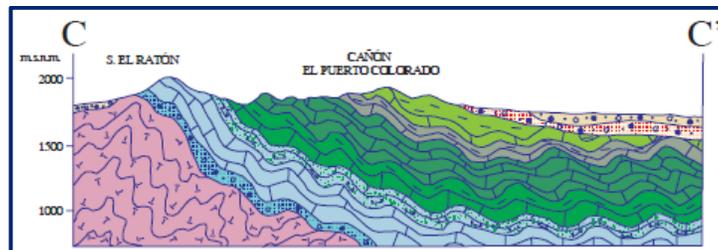
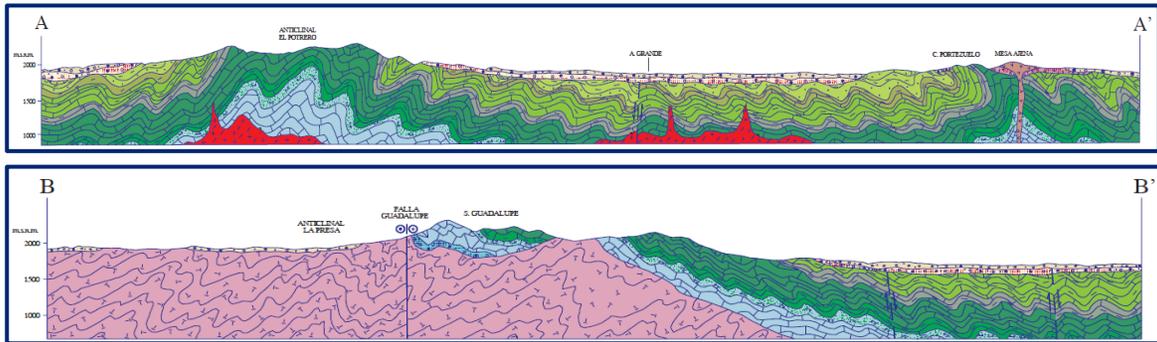
Fuente: Carta Geológica-Minera G14-103 "Concepción del Oro" Esc. 1:250.000 (SGM, 2000)



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-D58 "Pendencia" Esc. 150.000 (SGM, 2000)



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-C51 "Sierra Zuloaga" Esc. 150.000 (SGM, 2003)



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-C61 "Cedros" Esc. 150.000 (SGM, 2004)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica e hidrogeológica, es posible identificar la presencia de un acuífero, en general de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico; constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, coluviales y conglomerados; y en su porción inferior por rocas sedimentarias fracturadas y alteradas.

El medio granular poroso está conformado por los depósitos no consolidados o semi-consolidados, y conglomerados que incluyen materiales clásticos de granulometría diversa, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en las sierras que delimitan el acuífero; estos materiales presentan permeabilidad media a baja y se ubican en la proximidad del cauce de los arroyos y en las planicies.

Subyaciendo a estos depósitos, se presenta una secuencia de lutitas y de lutitas y areniscas, que presentan fracturamiento y alteración. Su espesor promedio conjunto alcanza varias centenas de metros dependiendo de su deformación estructural.

Debajo de la unidad superior, las calizas cretácicas y jurásicas representan un acuífero de buen potencial por a su alta permeabilidad, que puede presentar condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas por lutitas y limolitas.

Por su posición estratigráfica y ubicación forman las principales sierras que limitan al valle, constituyendo las zonas de recarga más importantes.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración realizadas en estudios previos (1971, 1990, 2004, 2007, 2014), 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 **1.0×10^{-6} a 3.2×10^{-3} m²/s**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **2.1×10^{-9} a 1.8×10^{-5} m/s (0.0002 a 1.6 m/d)**.

No fue posible realizar una estimación del coeficiente de almacenamiento, debido a que la corta duración de las pruebas y a que los bajos caudales de extracción no permitieron el registro de abatimientos en los aprovechamientos más cercanos. Sólo en algunos pozos de la mina se pudo obtener valores de rendimiento específico, que varían de 0.002 a 0.05

5.1. Piezometría

Para la descripción del comportamiento de los niveles piezométricos, se cuenta con información de los estudios hidrogeológicos realizados en 2004, 2006 y 2007 y de la recabada por la Dirección Local en Zacatecas para diferentes años, incluido el año 2018.

Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2018, que es el que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

5.3 Comportamiento hidráulico

5.3.1 Profundidad del nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2018 muestra que los valores varían, de manera general, de 20 a 130 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía, de manera general, desde el centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. Los valores más profundos se observan en la porción suroccidental del acuífero, al norte y sur de Sabana Grande, donde el nivel estático se detecta a profundidades de 100 y 130 m, respectivamente. En la mayor parte de los valles, la profundidad varía de 20 a 40 m (figura 4).

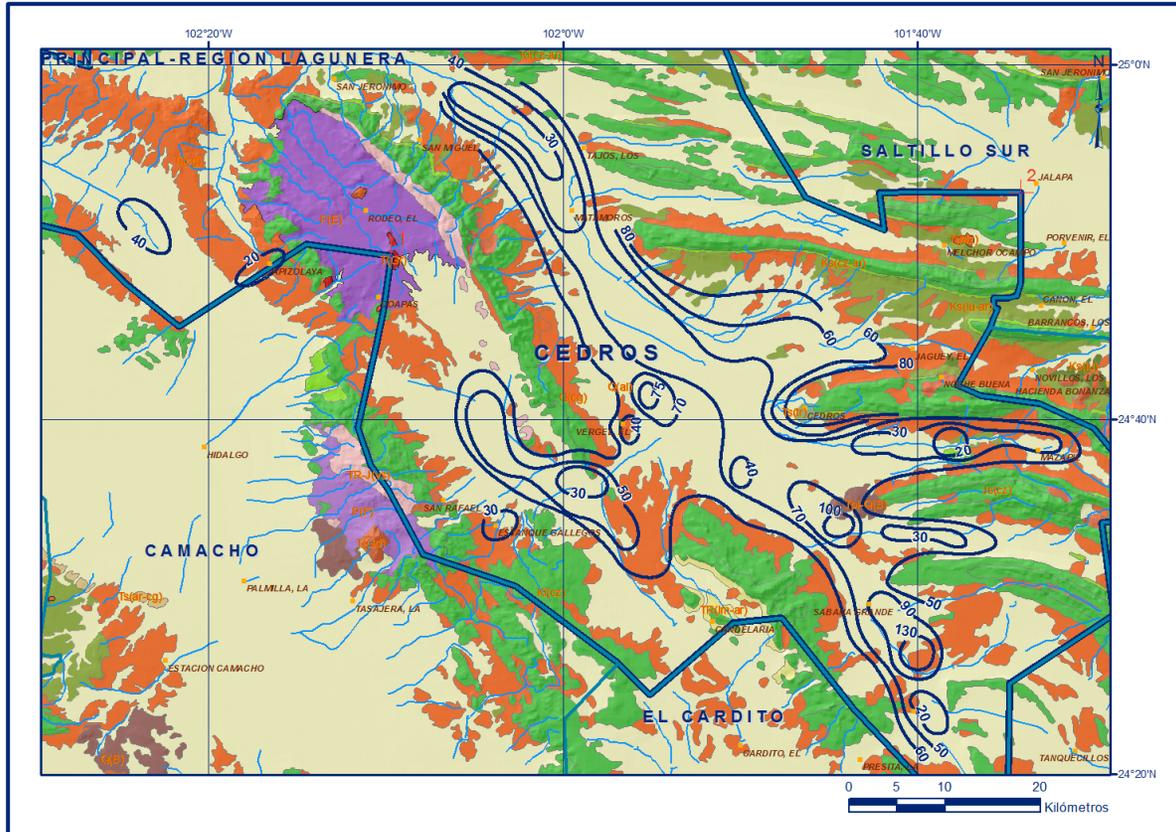


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2018)

5.3.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2018 registró valores que varían de 2270 a 1350 msnm. Las menores elevaciones, de 1350 a 1400 msnm, se registran en la porción norte del acuífero, a la altura del poblado San Jerónimo, hacia el límite con el acuífero Saltillo Sur del estado de Coahuila.

Los valores máximos, de 2200 a 2270 msnm, se presentan en la porción suroccidental del acuífero, en el valle de Mazapil, al oeste de la Mina Peñasquito; y de 1900 a 1800 msnm en los valles de Sabana Grande y San Rafael; desde donde descienden gradualmente hacia las regiones bajas por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo SE-NW.

En los valles de Mazapil y San Rafael las direcciones preferenciales de flujo subterráneo son E-W y W-E, respectivamente, que se unen a la dirección preferencial general a la altura del poblado Cedros (figura 5).

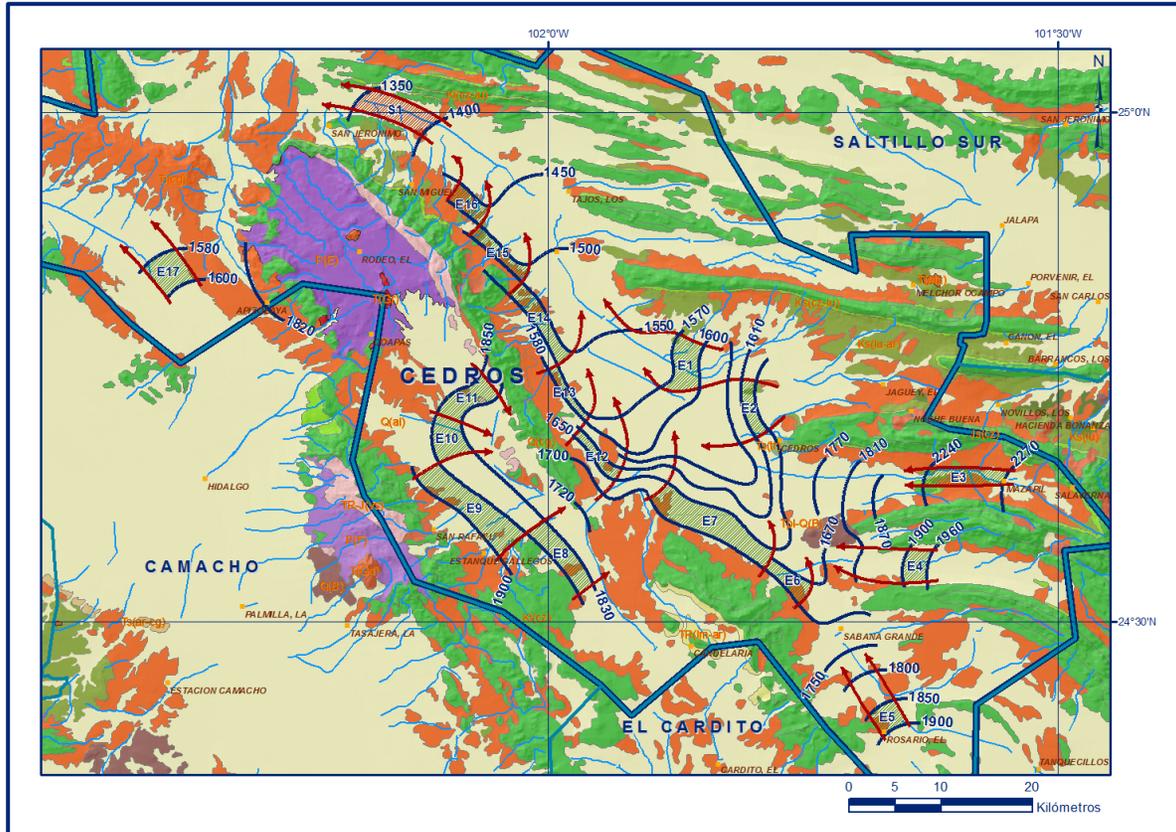


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2018)

5.3.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2018 registró valores de abatimiento en toda la zona de explotación, que varían de 1.0 a 10 m, con valores puntuales de hasta 15 m, que representan valores extremos de 0.1 a 1.7 m anuales, y se registraron desde San Jerónimo en la porción noroccidental, hasta Sabana Grande en el extremo suroriental, incluido también el valle de Mazapil.

En donde el abatimiento anual varía de 0.1 a 0.6 m anuales. Sólo en el valle de San Rafael se observaron recuperaciones de 1.0 m, es decir 0.1 m anuales (figura 6).

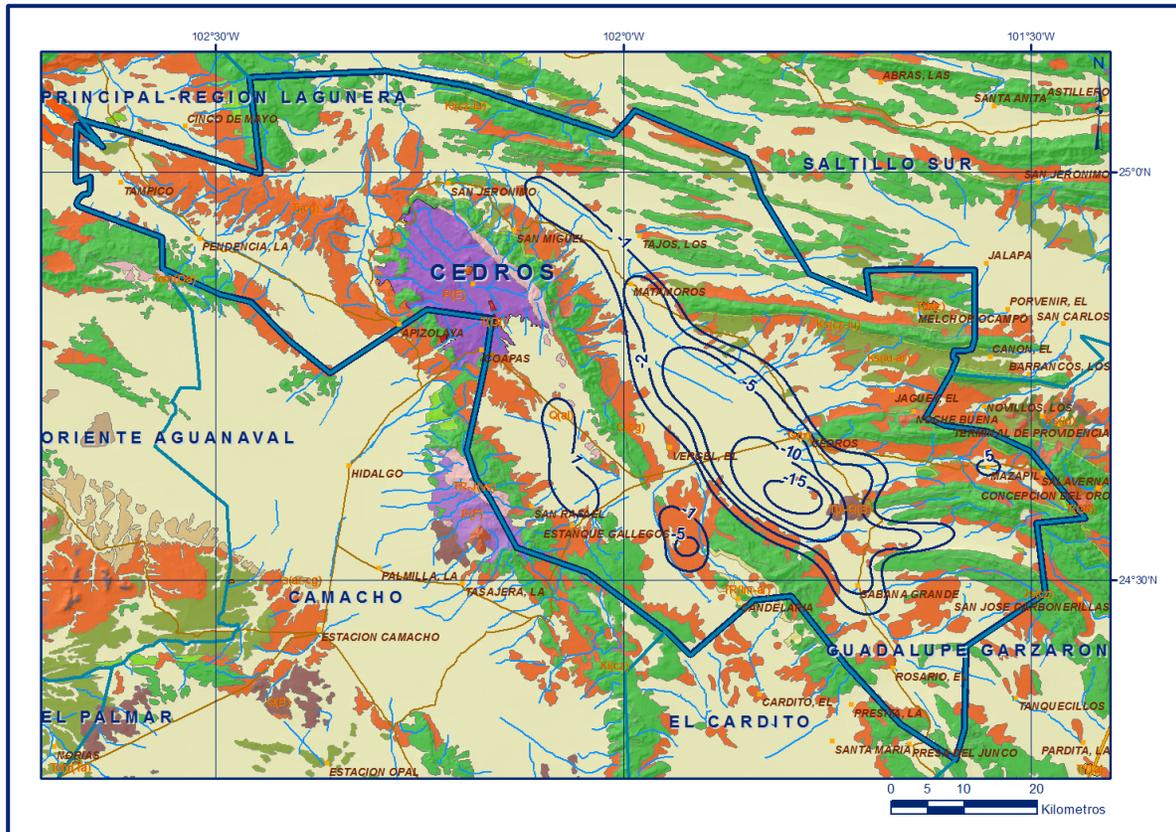


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2018)

5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de actividades de campo realizadas en el periodo 2016-2018, por la Dirección Local Zacatecas, se tomaron 27 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales.

De los resultados obtenidos a los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaban de 268 a 2525 mg/l, 15 muestras superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. de STD, para el agua destinada al consumo humano.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), de manera general, el agua del acuífero se clasifica como dulce a salobre. Sin embargo predomina el agua dulce, ya que con excepción de 4 muestras, los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; se presentan valores extremos de 367 a 3630 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores de temperatura varían de 17 a 34 °C y el pH varía de 7.1 a 9.2, por lo que se concluye que el agua se considera ligeramente alcalina.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las familias de agua que predominan son la bicarbonatada-cálcica-magnésica (11 muestras) y bicarbonatada-sódica (10 muestras); en menor proporción se presenta agua de la familia sulfatada-mixta (6 muestras). Estos tipos de agua son comunes en acuíferos alojados en rocas o sedimentos calcáreos, evaporíticos, de ambiente lagunar.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) predominan 3 tipos de agua: 11 muestras de agua se clasifican como C_3S_1 , que corresponde a salinidad alta con bajo contenido de sodio intercambiable.

Cuya utilización en la agricultura requiere de suelos con buen drenaje y lavados periódicos; 9 muestras de agua se clasifican como C_3S_2 , que representa agua de salinidad alta con contenido medio de sodio intercambiable, que puede utilizarse en cultivos tolerantes a la salinidad, en suelos con buen drenaje y puede requerir lavados periódicos; y 5 se 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 llevado a cabo en el año 2007 y complementada con información 2018 del Registro Público de Derechos del Agua (REPD), se tienen registradas un total de 241 obras que aprovechan el agua subterránea, 182 son pozos, 53 norias y 6 manantiales; de las cuales 183 están activas y 58 se consideran inactivas. De las obras activas, 67 se destinan al uso industrial, 35 para uso agrícola, 35 para uso pecuario, 22 más para uso público-urbano, 17 tienen un uso doméstico y 1 para servicios. Los 6 manantiales identificados son para uso público-urbano.

El volumen de extracción asciende a **43.3 hm³ anuales**, de los cuales 30.2 hm³ (69.8%) se destinan al uso industrial (incluidos 6.5 hm³ de desagüe de las obras mineras), 10.7 hm³ (24.7 %) para uso agrícola, 1.1 hm³ (2.5 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 1.2 hm³ (2.8%) para uso doméstico, y el restante 0.1 hm³ (0.2%) para servicios.

A través de los **6 manantiales** identificados, se descarga un caudal pequeño de 2.8 lps, que equivalen a 0.08 hm³ anuales, que para fines del balance de aguas subterráneas se considera despreciable.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2009 a 2018, en una superficie de **1545 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 se expresa como:

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

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

7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración 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 los volúmenes utilizados para uso agrícola y público-urbano son pequeños para fines del balance de agua subterránea se considera que no existe recarga incidental.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, 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 los valles y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2018, mostrada en la figura 5.

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

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

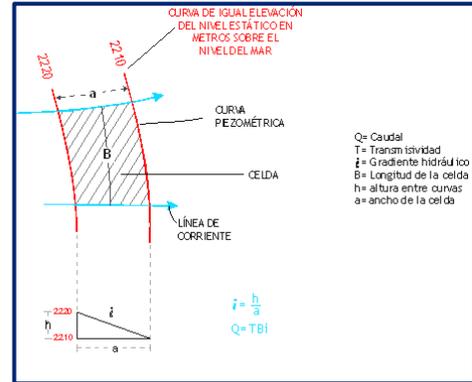
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



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 **32.7 hm³/año**.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (2018)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	6000	2650	10	0.0038	0.0003	0.0068	0.2
E2	6400	1500	40	0.0267	0.0003	0.0512	1.6
E3	8000	2600	60	0.0231	0.0006	0.1108	3.5
E4	3800	2600	60	0.0231	0.0008	0.0702	2.2
E5	3200	2800	50	0.0179	0.0005	0.0286	0.9
E6	5200	1800	30	0.0167	0.0005	0.0433	1.4
E7	13800	3200	50	0.0156	0.0011	0.2372	7.5
E8	8500	2300	20	0.0087	0.0003	0.0222	0.7
E9	11800	2800	50	0.0179	0.0003	0.0632	2.0
E10	4520	3200	20	0.0063	0.0010	0.0283	0.9
E11	5900	2600	20	0.0077	0.0010	0.0454	1.4
E12	6300	1080	40	0.0370	0.0003	0.0700	2.2
E13	6520	930	10	0.0108	0.0003	0.0210	0.7
E14	9000	1700	20	0.0118	0.0005	0.0529	1.7
E15	7200	1300	50	0.0385	0.0005	0.1385	4.4
E16	4250	2250	50	0.0222	0.0003	0.0283	0.9
E17	4100	4000	20	0.0050	0.0008	0.0164	0.5
TOTAL							32.7

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, adaptados al espesor saturado.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B) y salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **43.3 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2018, mostrada en la figura 5.

En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal es de **1.1 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2018)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2800	7850	50	0.0064	0.0020	0.0357	1.1
TOTAL							1.1

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2009-2018 (figura 6). Con base en ella y considerando un rendimiento específico de 0.01, se determinó la variación del almacenamiento, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

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

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de - 22.0 hm³, es decir, un promedio anual de - **2.4 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2018)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
1	1	61.3	0.01	0.6
-5	-5	5.7	0.01	-0.3
-1 a -5	-3	32.9	0.01	-1.0
5	5	4.7	0.01	0.2
-15	-15	22.8	0.01	-3.4
-10 a -15	-12.5	72.8	0.01	-9.1
-5 a -10	-7.5	176.0	0.005	-6.6
-2 a -5	-3.5	225.4	0.002	-1.6
-1 a -2	-1.5	255.9	0.002	-0.8
TOTAL		857.5	TOTAL	-22.0
Promedio anual				-2.4

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

$$\begin{aligned}
 R_v &= B + Sh \pm \Delta V(S) - E_h \\
 R_v &= 43.3 + 1.1 - 2.4 - 32.7 \\
 R_v &= 9.3 \text{ hm}^3
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned}
 R &= R_v + E_h \\
 R &= 9.3 + 32.7 \\
 R &= 42.0 \text{ hm}^3/\text{año}
 \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

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 inducida. Para este caso su valor es **42.0 hm³/año**, de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se estimó sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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/o prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso de este acuífero no existen descargas naturales comprometidas. No se considera comprometido el volumen de salidas subterráneas que tienden a dirigirse hacia el acuífero vecino al norte Saltillo Sur, porque la zona en que éstas fueron evaluadas se localiza a poco más de 30 km del límite entre ambos acuíferos, a que no está considerado como un flujo de entrada hacia este último acuífero, y a que no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento en la dicha zona limítrofe. Por lo tanto, **DNC= 0.0 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 (REPD), 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 **42,018,100 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 42.0 - 0.0 - 42.018100 \\ \text{DMA} &= -0.018100 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **18,100 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1990. Estudio de prospección geohidrológica y exploración geofísica en las zonas marginadas del estado de Zacatecas. Realizado por Exploraciones y Estudios Geológicos, Geotécnicos y Geohidrológicos, EXYCO, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 3218 Cedros, estado de Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. Estudio geohidrológico en la zona de Guadalupe Garzarón, en el estado de Zacatecas. Realizado por Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos, S.A., (EGEOCISA).