



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL CARDITO (3222), 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.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	9
3.4	Geomorfología.....	10
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología estructural	19
4.3	Geología del subsuelo	20
5	HIDROGEOLOGÍA.....	22
5.1	Tipo de acuífero	22
5.2	Parámetros hidráulicos.....	22
5.3	Piezometría	23
5.4	Comportamiento hidráulico.....	23
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	23
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	24
5.4.3	Evolución del nivel estático	25
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	26
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	27
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	28
7.1	Entradas	28
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	29
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	29
7.2	Salidas.....	31
7.2.1	Extracción de bombeo (B).....	31
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	31
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	31
8	DISPONIBILIDAD	33
8.1	Recarga total media anual (R).....	33
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	34
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	34
9	BIBLIOGRAFÍA	35

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 El Cardito, definido con la clave 3222 por la Comisión Nacional del Agua.

Se localiza en la porción nororiental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 23° 35' y 24° 29' de latitud norte y entre los meridianos 101° 25' y 102° 13' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,794 km².

Limita al norte este con el acuífero Cedros, al este con Guadalupe Garzarón, al sur con el acuífero Puerto Madero; al oeste con Guadalupe de Las Corrientes y al noroeste con Camacho, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al sureste su límite es con el acuífero Santo Domingo, perteneciente al estado de San Luis Potosí (figura 1).

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero se localiza casi en su totalidad en el municipio de Mazapil, la porción sur y suroccidental pertenecen al municipio Villa de Cos.



Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 3222 EL CARDITO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	56	6.4	23	44	19.3	
2	101	58	54.1	23	46	15.2	
3	102	3	22.7	23	44	44.8	
4	102	7	36.7	23	47	26.5	
5	102	11	26.4	23	51	16.6	
6	102	13	17.5	23	54	10.0	
7	102	10	46.1	23	59	1.8	
8	102	13	27.0	24	3	28.0	
9	102	8	49.2	24	12	16.0	
10	102	2	55.0	24	12	37.5	
11	101	59	34.4	24	14	20.5	
12	101	59	55.2	24	23	5.8	
13	101	56	53.5	24	26	15.4	
14	101	55	5.9	24	24	27.8	
15	101	50	23.5	24	28	30.7	
16	101	47	40.4	24	28	48.5	
17	101	43	39.1	24	23	42.3	
18	101	39	40.5	24	19	25.8	
19	101	35	36.3	24	16	45.8	
20	101	37	38.5	24	14	59.0	
21	101	34	2.3	24	7	47.4	
22	101	31	47.7	23	59	3.4	
23	101	26	18.4	23	54	12.3	
24	101	24	35.9	23	44	23.6	DEL 24 AL 25 POR EL LIMITE ESTATAL
25	101	36	42.9	23	34	40.1	
26	101	39	8.0	23	36	3.7	
27	101	47	58.9	23	42	34.6	
1	101	56	6.4	23	44	19.3	

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

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 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. El segundo rige en la porción sur y suroccidental del acuífero que pertenecen al municipio Villa de Cos 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 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.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

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 la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1980. Entre sus actividades principales destacan el censo de aprovechamientos, piezometría, toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos y el muestreo de roca para análisis petrográfico y paleontológico. Realiza un análisis de la región para identificar las zonas de recarga al acuífero e identifica zonas con buenas posibilidades para la explotación del agua subterránea.

RESUMEN DE CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS EN LOS ACUÍFEROS DEL ESTADO DE ZACATECAS UBICADOS DENTRO DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA CUENCAS CENTRALES DEL NORTE. Realizado por la Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, en 1999. Este estudio presenta el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero, recarga y sus componentes, salidas horizontales y extracción por bombeo, así como datos fisicoquímicos del agua, precipitación pluvial y geología.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS VILLA GARCÍA, EL SALVADOR, GUADALUPE GARZARÓN, CAMACHO Y EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS Y EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS GARCÍA DE LA CADENA, PINO SUÁREZ Y CORRALES, ZAC. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C., para la Comisión Nacional del Agua, en 2007.

El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento del flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, mediante la obtención de información procedente de las redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua de acuíferos del estado de Zacatecas, entre los cuales se incluye El Cardito, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, determinar la recarga media anual del agua subterránea y las componentes de balance de agua subterránea.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROLÓGICA Y DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS EL CARDITO Y GUADALUPE GARZARÓN, ZACATECAS. Realizado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente IDEAS, S.A. de C.V., para la Compañía M³ Mexicana S. de R.L. de C.V., en 2011.

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga. Presenta una actualización de la disponibilidad media anual de agua en estos dos acuíferos.

A partir de censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de extracciones, pruebas de bombeo y reconocimiento geológico en campo; realiza además estudios geofísicos de magnetometría, gravimetría y sondeos electromagnéticos realizados en ambos acuíferos. En este estudio se basó el documento de Determinación de la Disponibilidad de Agua Subterránea de ambos acuíferos.

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ACUÍFERO EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por el Departamento de Hidrogeología, Minera Peñasquito, GoldCorp, para el proyecto Camino Rojo GoldCorp, México, en 2014.

El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica, generar información hidrogeológica para calcular su recarga y actualizar el cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, análisis 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 media anual. Incluye además estudios de prospección gravimétrica y sondeos magnetotelúricos, muestreo de aguas, análisis e interpretación de datos hidrogeoquímicos.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO EL CARDITO, ZACATECAS.

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

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la transición de dos provincias fisiográficas.

Una pequeña zona en la región norte del acuífero pertenece a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, que se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S, constituidas por rocas sedimentarias, principalmente calcáreas, producto del levantamiento y deformación de rocas principalmente mesozoicas; la mayor parte de la superficie del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro, que se caracteriza por presentar amplias llanuras, con pequeñas sierras aisladas y lomeríos.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), la zona que corresponde al área del acuífero comprende dos subprovincias fisiográficas: Sierras Transversales, que pertenece a la provincia Sierra Madre Oriental, y Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, perteneciente a la provincia Mesa del Centro.

La Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas.

Se trata de una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m. La Subprovincia 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.

La Sierra Madre Oriental representa una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que presenta una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey; está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles en su centro.

Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados. La Subprovincia Sierras Transversales está integrada por sierras perpendiculares a los cuerpos centrales de la Sierra Madre Oriental, separadas unas de otras por llanuras más o menos amplias. En la parte central varios pequeños pliegues paralelos descienden desde la subprovincia de los Pliegues Saltillo-Parras, hasta el distrito minero de Concepción del Oro, Zacatecas. Su característica más notable es la complejidad litológica que presenta, manifestada por afloramientos de rocas sedimentarias, principalmente calcáreas, metamórficas e ígneas intrusivas y extrusivas.

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 se presentan cuatro tipos de clima: Muy Seco Semicálido (BW_{hw}), Seco Semicálido (BS_{0hw}), Seco Templado (BS_{0kw}) y Semiseco Templado (BS_{1kw}).

El clima que predomina que la mayor parte de la superficie del acuífero es el Seco Templado, el cual cubre el 79% de su superficie total; en la porción serrana ubicada al norte del acuífero, abarcando el 11% del área total, se registra clima Semiseco Templado; en tanto que hacia el extremo oeste se presentan los climas Seco Semicálido, cubriendo el 5% del área total, y Muy Seco Semicálido, que abarca el 5% restante del área. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 11 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: Gruñidora, Concepción de la Norma, Purísima de Cifuentes, Sierra Hermosa, San Andrés, La Victoria, San Tiburcio, Mazapil, Agua Nueva, Cedros y Nuevo Mercurio, cuyo registro que comprende varios periodos, de 26 a 50 años.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **319.8 mm** y **16.6°C** respectivamente. En lo que respecta a la evaporación potencial, solo seis estaciones tienen información, y su valor varía de **1819.5 mm anuales**, registrados en la estación Purísima de Fuentes, a **2215 mm** anuales en la estación Sierra Hermosa.

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 abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 37 “El Salado”, Subregión Hidrológica “El Salado”, cuenca “Camacho-Gruñidora”. 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.

Debido a que la lámina media anual de precipitación es baja, los arroyos son escasos y de tipo intermitente, cuyos escurrimientos desaparecen hacia el centro de los valles en los que el material aluvial alcanza los máximos espesores. 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.

La región se caracteriza por tener una serie de llanuras desérticas, en general con escurrimiento superficial de muy corta longitud, ya que se infiltra en las rocas calizas que conforman las sierras y en los piedemonte.

El tipo de drenaje es predominantemente de tipo enrejado en las zonas que presentan plegamientos, que se transforma a subparalelo y subdendrítico conforme se desciende por el pie de monte y se llega a los valles.

En las planicies los escurrimientos desaparecen por evaporación o se infiltran lentamente, originando la presencia de suelos salinos.

Localmente, en el área de la cuenca donde se ubica el acuífero, existen algunas corrientes como son los arroyos Seco, El Caracol, San Felipe, El Muerto y Salitrillo, los cuales desaparecen al descender hacia las planicies.

3.4 Geomorfología

El paisaje del relieve dentro del área se caracteriza por la presencia de los siguientes sistemas de topoformas: sierras, que se presentan hacia las porciones norte y sur del acuífero; bajadas con lomeríos, que se extienden en la mayor parte de la región, hacia las regiones suroriental y occidental; bajadas típicas en las porciones norte, este y centro sur.

En la región centro y norte se presentan llanuras desérticas de piso rocoso o cementado y llanuras desérticas en la región norte.

El área del acuífero se caracteriza por la presencia de un grupo de sierras alargadas, orientadas en sentido NW-SE. La intensa erosión ha contribuido en el modelado del relieve caracterizado por cimas redondeadas con pendientes suaves, dando origen en la porción oeste a las Sierras Gruñidora, Aduas, El Borrado y El Mimbres, cuya elevación varía de 2,150 a 2,300 msnm.

En las partes bajas de ellas se han acumulado depósitos de piedemonte, así como abanicos y extensas llanuras aluviales. La región se encuentra surcada por arroyos intermitentes que forman un sistema de drenaje de tipo enrejado y subdendrítico. Los fenómenos cársticos se presentan de manera aislada y se manifiestan con la presencia de algunas cavernas de disolución.

4 GEOLOGÍA

La geología general que aflora en la zona que comprende el acuífero está constituida por un gran paquete de material aluvial, rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas cuya distribución geográfica se muestra en la figura 2.

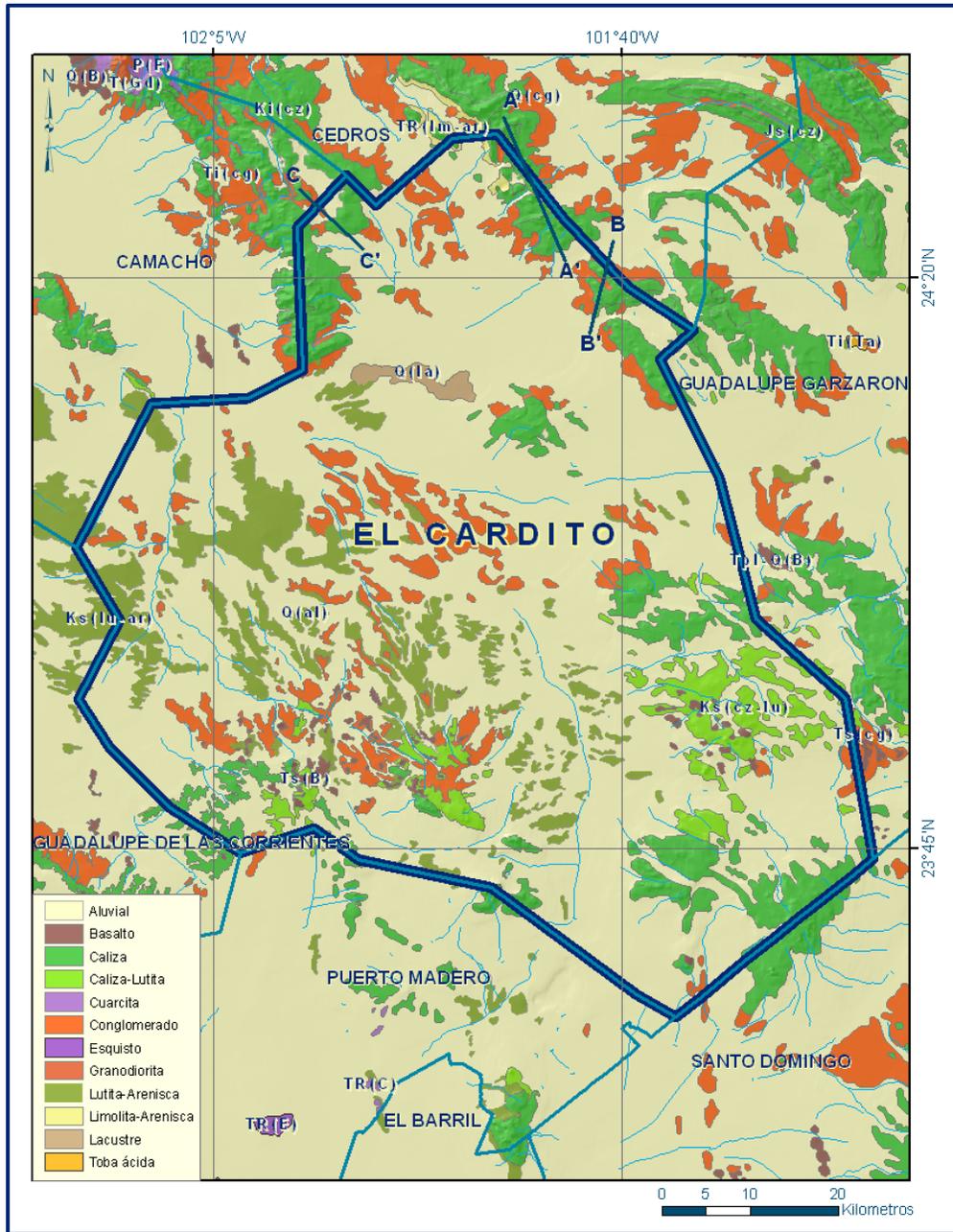


Figura 2. Geología general del acuífero

Regionalmente, la base de la columna estratigráfica está constituida por filitas y limolitas de la Formación Taray del Triásico Medio-Superior, que aflora en la porción sur de la Sierra de Candelaria; hacia la cima subyace discordantemente a la Formación Nazas del Triásico Superior-Jurásico Inferior, la cual aflora hacia la porción oeste del acuífero, dentro de las Sierras de San Julián, Guadalupe, Candelaria y Rodríguez, su cima se encuentra en contacto discordante con un conglomerado perteneciente a la Formación La Joya.

El Jurásico Medio está representado por conglomerado y arenisca de la Formación La Joya, que subyace discordantemente a la Formación Zuloaga; aflora en la Sierra de San Julián. En el Jurásico Superior se depositaron las calizas de la Formación Zuloaga, (Oxfordiano-Kimmeridgiano), que subyacen concordantemente a la Formación La Caja y que afloran en la mayor parte de la zona. En las inmediaciones de Galeana, N.L., aflora una secuencia de yesos, calizas dolomíticas y anhidritas correspondientes a la Formación Olvido del Oxfordiano-Kimmeridgiano.

Se encuentran en contacto discordante con la Formación Huizachal y hacia su cima yace concordantemente con la Formación La Casita, la cual cambia lateralmente de facies con la Formación Zuloaga. Limolitas y calizas de la Formación La Caja del Tithoniano afloran al noreste de la zona y cambian lateralmente de facies, hacia los sedimentos pelítico-arenosos de la Formación La Casita. Sedimentos calcáreo-arcillosos de la Formación Taraises del Berriasiano al Hauteriviano, afloran en gran parte de la zona.

Subyace concordantemente a la Formación Cupido; cambia lateralmente de facies en el Berriasiano con lutitas y areniscas de la Formación Carbonera. Del Hauteriviano Tardío al Aptiano Temprano se depositaron calizas de la Formación Cupido, que aflora por toda la zona; subyace concordantemente a calizas y lutitas de la Formación

La Peña del Aptiano, ésta a su vez subyace transicional y concordantemente a calizas arrecifales de la Formación Aurora, la cual es correlacionable con la Formación Cuesta del Cura del Albiano-Cenomaniano (calizas-lutitas), hacia su cima se encuentra en contacto con la Formación Indidura del Cretácico Superior y en la región de Galeana, N.L. con la Formación Agua Nueva.

Durante el Cenomaniano Tardío al Turoniano se depositaron sedimentos arcillo calcáreos de la Formación Indidura (posiblemente su rango sea hasta el Santoniano), los cuales cambian gradualmente a sedimentos calcáreo-arcillosos de la Formación Agua Nueva. En el Coniaciano-Santoniano se depositan sedimentos areno-arcillosos de la Formación Caracol que subyace concordantemente a la Formación Parras. Hacia la porción noreste de la zona mediante cambio lateral de facies la Formación Caracol cambia a lutitas y calizas de la Formación San Felipe. La Formación Parras está constituida por lutitas y areniscas, su cambio a la Formación Caracol es transicional, esta unidad es correlacionable en la región de Galeana con la Formación Méndez. El Terciario Inferior está representado por un conglomerado polimíctico con areniscas de la Formación Ahuichila del Eoceno.

Lo sobreyace una brecha de composición riolítica del Oligoceno. Durante el Mioceno tiene lugar una etapa de vulcanismo que origina el campo volcánico Los Encinos, compuesto por basaltos y andesitas basálticas. Durante el Neógeno se acumularon conglomerados polimícticos mal consolidados; hacia los valles se depositaron materiales coluviales y aluviales y en donde las condiciones lo permitieron, depósitos lacustres y travertinos (Carta Geológica-Minera G14-10 “Concepción del Oro”, Esc. 1:250,000, SGM, 2000).

Del Cretácico Superior aparece un macizo intrusivo de composición sienítica del Maestrichtiano. En el Paleógeno-Neógeno se reporta la presencia de diques monzoníticos del Plioceno.

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica de la región en la que se localiza el acuífero presenta rocas sedimentarias e ígneas extrusivas e intrusivas, cuya edad comprende del Triásico al Reciente (figura 2). Aunque no afloran todas las unidades de la estratigrafía regional, a continuación se describe cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

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, de 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 de manera aislada en la porción norte del acuífero, al este y noreste del poblado La Unión.

Su contacto inferior no se observa en el área del acuífero, mientras que su contacto superior es discordante con las rocas de la Formación Zuloaga.

Formación La Joya

Aflora en la Sierra Madre Oriental, en el subsuelo se encuentra distribuida en la Planicie Costera del Golfo. En su localidad tipo tiene más de 1,200 m de espesor que consisten de conglomerados, areniscas, areniscas conglomeráticas, lutitas y limolitas de color rojo, ocasionalmente de color verde, de origen continental.

En la región en la que se ubica el acuífero está representada por un conglomerado constituido principalmente por fragmentos derivados de la Formación Nazas, a la cual sobreyace discordantemente y subyace, también en discordancia, a las calizas con nerineas de la Formación Zuloaga.

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 Mimbres 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.

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. Su espesor promedio es de 60 m.

Formación Cuesta del Cura

Está constituida por una caliza laminar de color gris claro a oscuro con estratificación ondulada y numerosos lentes y nódulos de pedernal negro. Aflora principalmente en la porción norte del acuífero, en los flancos de los anticlinales, así como en la región centro y suroriental, al noreste y sureste del poblado Primero de Mayo, en forma de elementos topográficos aislados, sobreyaciendo concordantemente a la Formación La Peña, y subyaciendo también concordantemente a la Formación Indidura. Presenta un espesor promedio de 80 m, aunque puede alcanzar hasta 250 m.

Formación Indidura

Generalmente aparece aflorando en las laderas de las sierras; consiste principalmente de dos series diferentes que están formadas, en la parte inferior, de caliza arcillosa dispuesta en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea que es de color amarillento.

La 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. Aflora de manera aislada en la sierra plegada ubicada en el margen noroeste, al norte del poblado Gruñidora.

Formación Caracol

Aflora localmente en las laderas de las sierras transversales de Santa Rita, Santa Rosa, La Laja y Zuloaga. Está constituida por capas de lutitas, con intercalaciones de arenisca en forma alternante.

La lutita es moderadamente calcárea y suave, 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.

El espesor de esta unidad puede alcanzar hasta 900 m en el valle de Mazapil (ubicado en el acuífero vecino Cedros), cubriendo concordante y transicionalmente a la Formación Indidura, mientras que es cubierta por rocas volcánicas y sedimentarias cenozoicas. Los afloramientos más importantes de esta unidad dentro del área del acuífero, se presentan en la porción centro-occidental, principalmente en las inmediaciones de los poblados San Martín y San Sebastián. Es cabalgada por la Formación Zuloaga del Jurásico.

Formación Parras

Secuencia detrítica constituida por lutitas calcáreas carbonosas de color gris oscuro a negro, muy fisiles, que alternan con estratos delgados de arenisca calcárea de color amarillento y de grano fino. Sus afloramientos son muy restringidos, sobreyaciendo a la Formación Caracol y cubierta discordantemente por la secuencia detrítica del Neógeno.

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 predominantemente 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 noroccidental, al sur del poblado La Pardita y al noreste de Puerto del Rosario. 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 amigdaloides, con relleno de cuarzo y calcita, cuyos afloramientos más importantes se localizan en la porción sur del acuífero, principalmente entre los poblados Primero de Mayo y Felipe Carrillo.

Conglomerado Polimíctico del Neógeno

Estos depósitos conglomeráticos se depositaron durante el periodo Mioceno-Plioceno en un ambiente continental, al pie de los terrenos recién emergidos. Se cree que durante la acumulación de este potente depósito, la región septentrional del área se comportaba tectónicamente inestable, debido a la dinámica de un sistema de fallas de desplazamiento lateral que actuaba en dicho sector, ocasionando la acumulación de un prisma relativamente potente de clásticos conglomeráticos.

Está constituido por gravas no consolidadas hasta semi-consolidadas ampliamente distribuidas en el área, con un espesor de hasta de 130 m al suroeste del acuífero. La edad asignada a esta unidad es del Mioceno al Plioceno, cubre a los basaltos del Mioceno.

CUATERNARIO

Aluvión

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. En general los aluviones se presentan como una mezcla de materiales de granulometría fina a gruesa, con una disposición heterogénea, en la cual superficialmente están sueltos y con una consolidación moderada a profundidad.

Dentro de la unidad de aluviones también se incluyen algunos conglomerados y depósitos muy locales de travertino, relacionados con la existencia de manantiales. Su espesor en algunos sitios alcanza 100 m, aunque localmente se presentan también pequeños depósitos de terrazas aluviales con espesores de 10 a 20 m.

Sedimentos Lacustres

Los valles y bolsones que constituyen las partes topográficamente más bajas de la zona están constituidos por sedimentos lacustres, que en el caso de lagunas efímeras se asocian a sales evaporíticas.

4.2 Geología estructural

A nivel regional, las estructuras más importantes fueron generadas por los esfuerzos compresivos del Orogenia Laramide mientras que las etapas de fallamiento distensivo ocurrieron durante el Terciario.

Se observan dos direcciones en las estructuras principales: NW-SE y 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 la vergencia general de las estructuras hacia el norte y nororiente.

La falla lateral izquierda San Tiburcio cruza la región de surponiente a norponiente, con rumbo NW-SE, en una longitud aproximada de 100 km. Se identifican tres fajas: la faja de sierras y valles, la faja de sierras y llanuras y la faja mineral; las cuales representan una sucesión progresiva de la deformación asociada en parte al fallamiento, enmarcado dentro del terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre (Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-10, escala 1:250,000. SGM, 2000).

La mayor parte de zona se encuentra ubicada en la subprovincia Sierras Transversales, perteneciente a la Sierra Madre Oriental, que se caracteriza por presentar montañas plegadas, falladas y en ocasiones afectadas por macizos intrusivos y por rocas volcánicas. La deformación que ocasionó esta subprovincia fue causada por el evento compresivo de la Orogenia Laramide.

A nivel regional, a partir del oeste, se pueden distinguir tres grupos de sierras, separadas por amplias llanuras denominadas Bolsones, formados al rellenarse de sedimentos antiguas depresiones originadas por fallas tectónicas o por erosión.

Estas sierras y llanuras son las siguientes: Sierra de Guadalupe Garzarón, Bolsón San Carlos o Laguna Jazminal, Zona de Sierras Transversales, Bolsón Cedros, Zona de la Sierra de Teyra y Bolsón San Simón. Las estructuras más importantes de la región son pliegues y cabalgaduras, así como fallas laterales y normales.

Los pliegues se localizan en las zonas topográficamente más elevadas (Sierras Gruñidora, El Toro, Los Picachos, El Jacalito y El Duraznillo), de varios kilómetros de longitud con ejes orientados en sentido NE-SW, predominantemente asimétricas con vergencia general hacia el NW, que afectan a todas las formaciones pre-cuaternarias.

Algunas cabalgaduras de orientación NW-SE e inclinación al NE, como las que se observan en la Sierra El Jacalito, se presentan oblicuas a los ejes de los pliegues antes descritos, posiblemente asociados a ellos, ya que no se observaron evidencias de un patrón de interferencia cartográfica en los pliegues.

Las fallas de desplazamiento lateral se observaron en un patrón conjugado, con orientación NW-SE para las fallas sinestrales, y casi E-W para las de desplazamiento dextral, en la Sierra Gruñidora.

Estas estructuras desplazan tanto a los ejes de los pliegues como a las cabalgaduras. Una serie de fallas normales de orientación NE-SW y NW-SE afecta a todas las unidades y estructuras pre-cuaternarias. En el área de San Felipe de Teyra las cabalgaduras son frecuentes en número y de mayor longitud, también oblicuas a los ejes de los pliegues.

Es muy probable que los pliegues, cabalgaduras y fallas laterales sean producto de un solo evento de deformación compresiva, con una importante componente lateral, los pliegues oblicuos a las cabalgaduras se interpretan como asociados a ellas en escalas (pliegues en "echelón"). Mitre (1989), interpreta la presencia de una falla lateral izquierda al oriente, que es un argumento a favor de un importante movimiento lateral de dirección NW-SE que genera las estructuras descritas en un solo evento posiblemente laramídico (Carta Geológico-Minera El Cardito G14-C71, escala 1:50,000. SGM, 1997).

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.

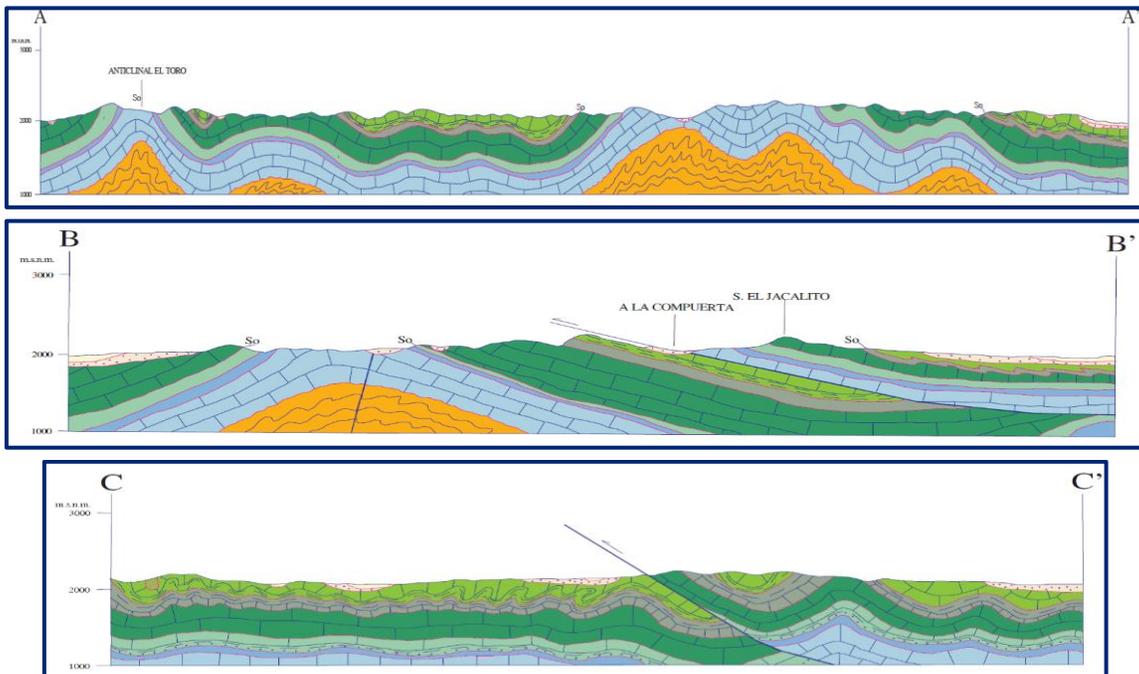
Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la zona.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, 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 las 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. El espesor de este acuífero puede alcanzar 300 m (figura 3).

Debajo de este paquete de rocas existe un acuífero alojado en rocas calizas que puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a la presencia de lutitas. Sus fronteras al flujo subterráneo están constituidas principalmente por rocas arcillosas cretácicas y jurásicas, así como por rocas ígneas extrusivas e intrusivas.



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-C71 "El Cardito". Esc. 1:50,000 (SGM, 1997)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido 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 del valle.

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, 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

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2014, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente se recopiló información de 3 pruebas más realizadas en el estudio de 2011 y se interpretaron 5 pruebas más, así como otras pruebas realizadas en el acuífero vecino Guadalupe Garzarón.

Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales indican que los valores medios de transmisividad varían entre $7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, con un valor promedio de $4.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores de conductividad hidráulica varían de 8.9×10^{-7} y $2.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.08 a 18.1m/d), con un valor promedio de $7.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (0.7 m/d), que se asocian a sedimentos de granulometría fina.

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 adoptaron valores de rendimiento específico entre 0.1 y 0.01.

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 generada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2007-2015, 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 muestra que los valores variaron, de manera general, de 10 a 80 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles. Los niveles estáticos someros, de 10 a 20 m, se midieron en la parte norte del acuífero, hacia las localidades de San José, El Calabazal y Gruñidora; y en el extremo sur, entre las poblaciones Efigenia y Las Codornices, y entre Sarteneja y Majoma. Los más profundos, de 70 a 80 m, se registran hacia las zonas limítrofes con los acuíferos Camacho y Guadalupe Garzarón, en toda la porción centro-norte del acuífero; así como al norte de Las Codornices (figura 4).

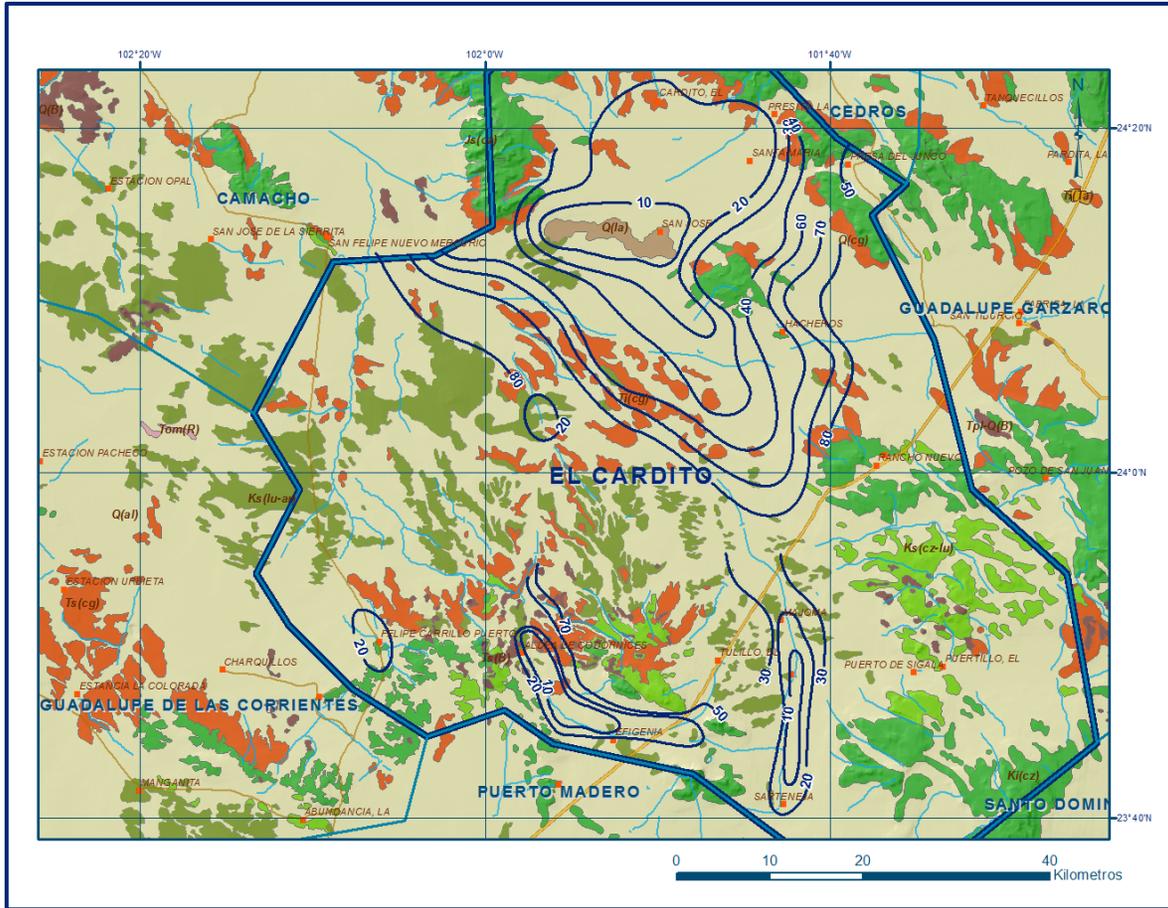


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático de 2015 registró valores que variaron de 2080 a 1630 msnm, decreciendo desde la porción sur del acuífero hacia la planicie aluvial localizada en la región centro-norte, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte, con alimentaciones provenientes de los flancos norte y oriental; que muestra un cambio hacia el noroeste, en dirección hacia el poblado San Felipe Nuevo Mercurio, en donde se presentan salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero vecino Camacho.

En la región suroccidental, en los límites con los acuíferos Guadalupe de Las Corrientes y Puerto Madero, se observa una trayectoria sureste-noroeste, que por efecto de la topografía se dirige hacia las localidades Colonia Felipe Carrillo Puerto y Las Codornices (figura 5).

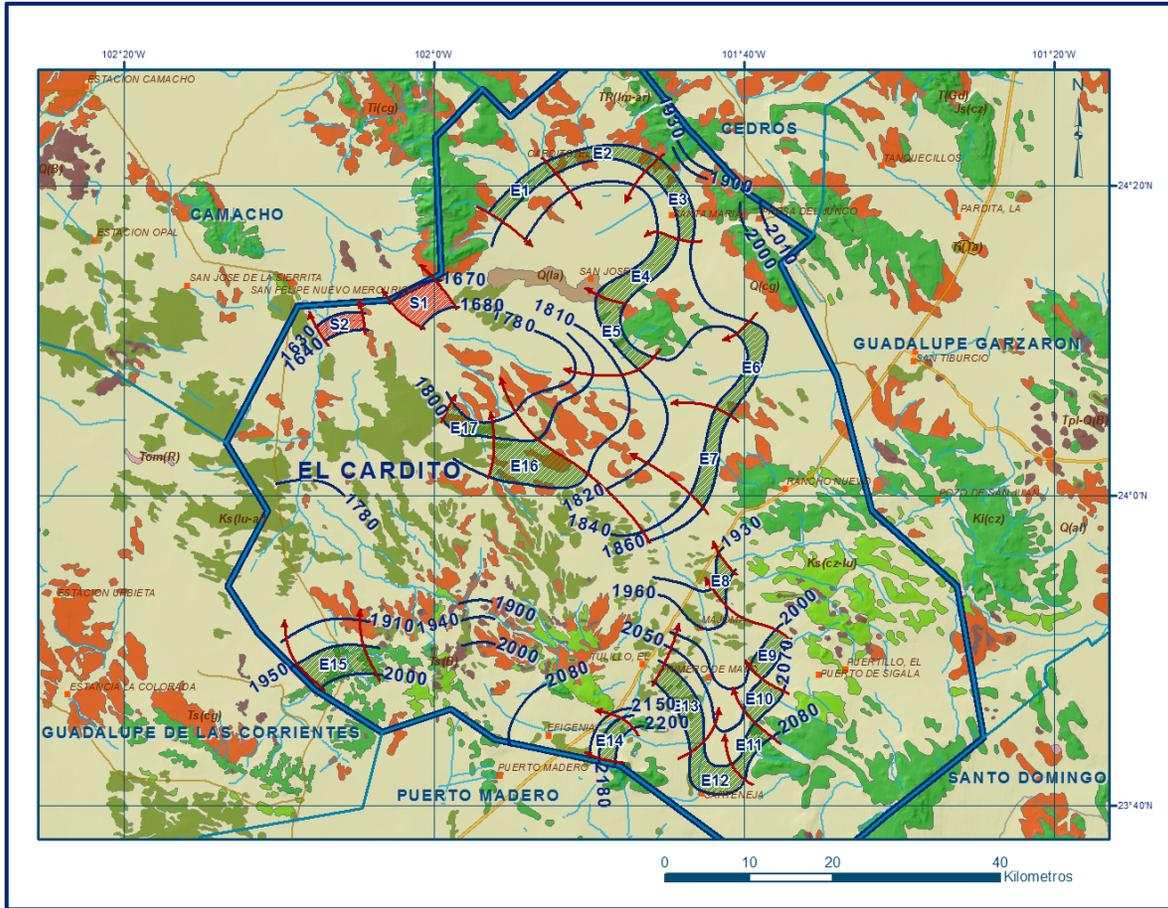


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2007-2015 registró valores puntuales tanto de abatimiento como de recuperación. Los abatimientos variaron de 2 a 4 m, 0.25 a 0.5 m anuales, con valores hasta 5 m, que se registraron en el extremo noroccidental, hacia el límite con el acuífero Camacho. Las recuperaciones variaron de 1 a 3 m (0.1 a 0.4 m anuales) y se presentan en la porción sur del acuífero, entre las localidades Majoma, Sarteneja y Efigenia.

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, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo (figura 6).

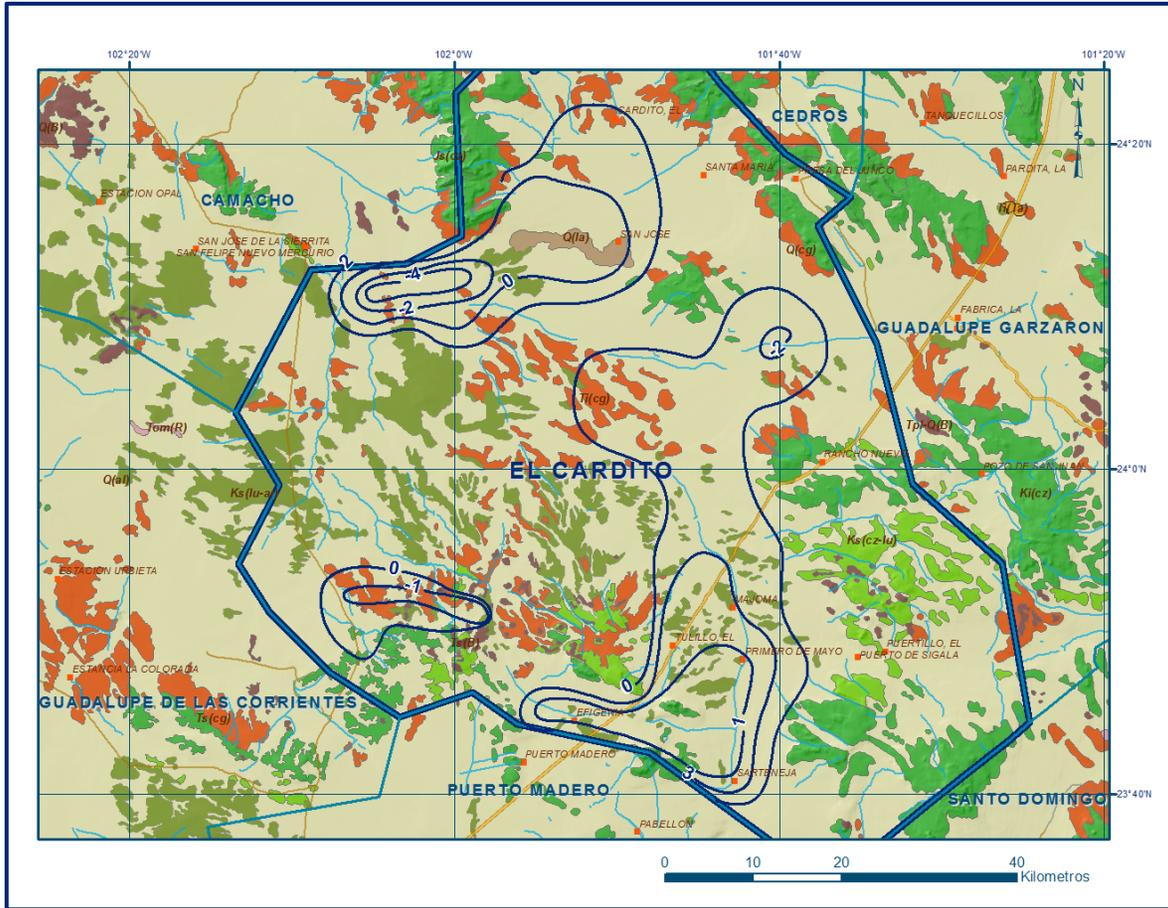


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007- 2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2014, se tomaron 19 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Adicionalmente, en el estudio realizado en 2011 se obtuvieron 20 muestras más.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se observa que los valores extremos de concentración de STD varían de 410 a 7268 ppm. Del total de muestras obtenidas en 2011 y 2014, la mayoría de ellas presentan una concentración de STD que supera 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., para el agua destinada al consumo humano.

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 superiores a 2000 $\mu\text{S/cm}$; con valores extremos de 461 y 8870 $\mu\text{S/cm}$. Las temperaturas registradas varían de 15.3 a 27.4 °C y el pH varía de 6.9 a 8.5.

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 sulfatada sódica, particularmente en la porción norte del acuífero. En menor proporción se presentan aguas sulfatas-cálcicas y bicarbonatadas cálcicas; la dos primeras se asocian a las zonas lacustres y/o presencia de yesos y la tercera familia representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas calcáreas.

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 20 muestras de agua obtenidas en 2011, 2 se clasifican como C4S4 (muy alto contenido de sales y muy alta concentración de sodio) que no son aptas para el uso agrícola, 8 se clasifican como C4S2 (muy alta salinidad y contenido medio de sodio) que sólo puede usarse en cultivos tolerantes a la salinidad, suelos permeables y con buen drenaje.

Las 10 muestras restantes se clasifican como C3S1 (alto contenido de sales y baja concentración de sodio) que es poco apta para el uso agrícola ya que no puede usarse en suelos con drenaje deficiente.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2014, se registraron un total de 124 obras que aprovechan el agua subterránea: 85 pozos, 37 norias y 2 manantiales; del total de obras, 71 están activas y 53 inactivas. De las obras activas, 16 (22.5 %) se destinan al uso agrícola, 24 (33.8%) al uso público-urbano, 22 (31.0 %) para uso pecuario, 9 (12.7%) para uso doméstico.

El volumen de extracción asciende a **7.5 hm³ anuales**, de los cuales 3.9 hm³ (52.0 %) se destinan al uso agrícola, 2.9 hm³ (38.7 %) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 0.7 hm³ (9.3 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico. El volumen que descarga a través de los 2 manantiales es muy pequeño y para fines de balance se considera despreciable.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el para el periodo 2007-2015, en una superficie de 1,450 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que los volúmenes 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 (R_v)

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

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal

B = Bombeo;

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento;

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte.

para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para el cálculo de las entradas por flujo 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:

$$Q = T * B * i$$

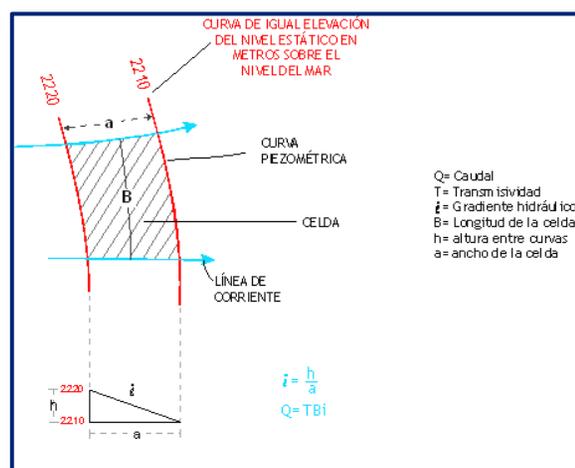
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas. En la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **13.5 hm³/año**. 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 y de los obtenidos por correlación hidrogeológica en los acuíferos vecinos Cedros, Guadalupe de las Corrientes y Guadalupe Garzarón, adaptados al espesor saturado en cada zona.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente e i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	8370	2045	20	0.0098	0.0003	0.0246	0.8
E2	9675	1675	20	0.0119	0.0003	0.0347	1.1
E3	10790	2230	20	0.0090	0.0003	0.0290	0.9
E4	9300	1490	20	0.0134	0.0005	0.0624	2.0
E5	8560	2230	20	0.0090	0.0005	0.0384	1.2
E6	12280	1860	20	0.0108	0.0005	0.0660	2.1
E7	11535	2045	20	0.0098	0.0005	0.0564	1.8
E8	4465	1300	30	0.0231	0.0002	0.0206	0.6
E9	4835	3160	50	0.0158	0.0002	0.0153	0.5
E10	4280	2230	20	0.0090	0.0002	0.0077	0.2
E11	5950	1675	10	0.0060	0.0002	0.0071	0.2
E12	6700	4095	10	0.0024	0.0002	0.0033	0.1
E13	11160	2045	10	0.0049	0.0003	0.0164	0.5
E14	4835	1860	20	0.0108	0.0003	0.0156	0.5
E15	7440	3720	50	0.0134	0.0002	0.0200	0.6
E16	8185	4280	10	0.0023	0.0003	0.0057	0.2
E17	5580	2230	10	0.0045	0.0003	0.0075	0.2
TOTAL							13.5

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y por salida del flujo subterráneo horizontal (Sh).

7.2.1 Extracción de bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **7.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático 2015 (figura 5); su valor estimado es de **2.3 hm³ anuales**, como se muestra en la tabla 3.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	5025	2230	10	0.0045	0.0020	0.0451	1.4
S2	5210	3720	10	0.0027	0.0020	0.0280	0.9
Tota salidas							2.3

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2007-2015 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta valores de rendimiento específico variable de 0.01 a 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 1,450 km², 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 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 85.8 hm³, por lo que el promedio anual es de 10.7 hm³.

Por lo tanto **$\Delta V(S) = 10.7 \text{ hm}^3$ anuales.**

Tabla 4. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2007-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-4	-4.0	21.6	0.1	-8.6
-2 a -4	-3.0	34.7	0.1	-10.4
-2	-2.0	7.8	0.1	-1.6
-1	-1.0	27.8	0.1	-2.8
0 a -1	-0.5	84.4	0.1	-4.2
0 a -2	-1.0	194.0	0.01	-1.9
0 a 3	1.5	537.9	0.1	80.7
1	1.0	147.2	0.1	14.7
0 a 2	1.0	217.2	0.01	2.2
1 a 3	2.0	177.4	0.05	17.7
Área de balance		1450.0	TOTAL	85.8
		Promedio anual		10.7

Solución de la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 7.5 + 2.3 - 13.5 + 10.7$$

$$R_v = 7.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 7.0 + 13.5$$

$$R = 20.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **20.5 hm³/año**.

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 del acuífero El Cardito, su valor es de 2.3 hm³ anuales que corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero vecino Camacho.

Por lo tanto **DNC = 2.3 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 (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **14,067,386 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 20.5 - 2.3 - 14.067386 \\ \text{DMA} &= 4.132614 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,132,614 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2007. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico y de Calidad del Agua en los Acuíferos Villa García, El Salvador, Guadalupe Garzarón, Camacho y El Cardito, Estado de Zacatecas y Evaluación Geohidrológica de los Acuíferos García de la Cadena, Pino Suárez y Corrales, Zac. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C.

Comisión Nacional del Agua. 2013. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero El Cardito (3222), estado de Zacatecas.

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