

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero El Cardito (3222),
Estado de Zacatecas***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CDX REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE"		R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CLAVE	ACUÍFERO	CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE ZACATECAS							
3222	EL CARDITO	12.1	0.0	7.542887	7.5	4.557113	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO EL CARDITO (3222), ESTADO DE
ZACATECAS***

México, D.F., Mayo de 2013

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	6
3.1.	Provincia fisiográfica	6
3.2.	Clima	7
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología	8
4.	GEOLOGÍA	8
4.1.	Estratigrafía	10
4.2.	Geología estructural	13
4.3.	Geología del subsuelo	14
5.	HIDROGEOLOGÍA	15
5.1.	Tipo de acuífero	15
5.2.	Parámetros hidráulicos	15
5.3.	Piezometría	16
5.4.	Comportamiento hidráulico	16
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	16
5.4.2.	Elevación del nivel estático	16
5.4.3.	Evolución del nivel estático	16
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	19
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1.	Entradas	20
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	21
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	21
7.2.	Salidas	23
7.2.1.	Bombeo (B)	23
7.2.2.	Evaporación potencial (Ev)	23
7.2.3.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	24
8.	DISPONIBILIDAD	25
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	26
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	26
8.3.	Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS)	26
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)	26
9.	BIBLIOGRAFÍA	27

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

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 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción nororiental del Estado de Zacatecas, 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 con el acuífero Cedros, al este con el acuífero Guadalupe Garzarón; al sur con el acuífero Puerto Madero; al oeste con el acuífero Guadalupe de Las Corrientes, al noroeste con Camacho, todos ellos pertenecientes al Estado de Zacatecas; al sureste limita con el acuífero Santo Domingo, perteneciente al Estado de San Luis Potosí (figura 1). Geopolíticamente el área que cubre el acuífero comprende parcialmente a los municipios de Mazapil y Villa de Cos.

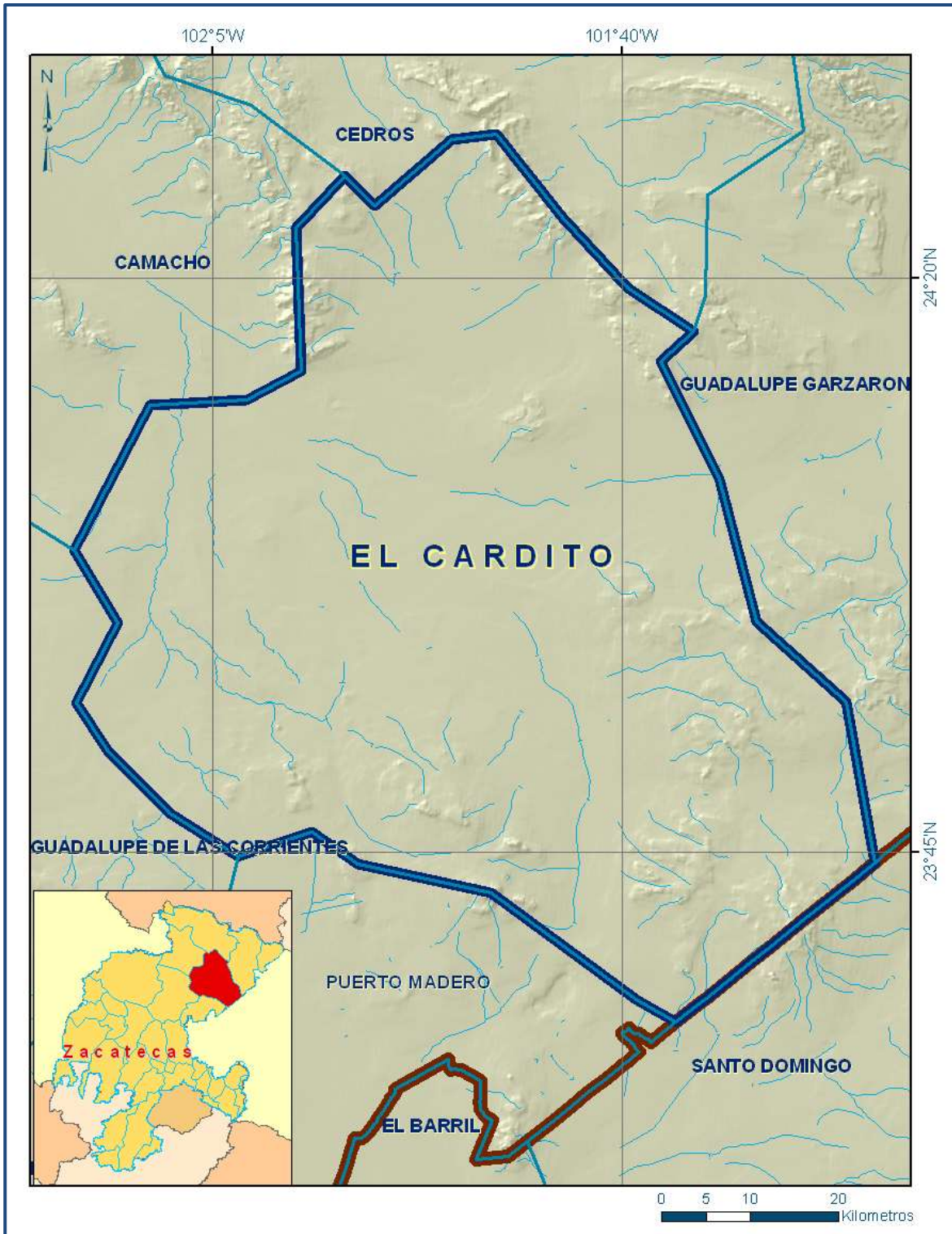


Figura 1. Localización del acuífero

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

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

ACUIFERO 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	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero El Cardito pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local de Zacatecas. Su territorio completo se encuentra 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 agua 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 al sur y suroriental del acuífero y es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de los Municipios de Fresnillo y Villa de Cos y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en esos Municipios”* publicado 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, vigente para el año 2013, el municipio de Mazapil se clasifica como zona de disponibilidad 7 y el municipio de Villa de Cos como zona de disponibilidad 6. El uso principal es el agrícola. No existe Distrito o Unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS, elaborado 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, la 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 y aquellas regiones 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, elaborado por la **Comisión Nacional del Agua, en 1999**. Este estudio proporciona información de las características geohidrológicas del acuífero, datos de precipitación, geología, características físico-químicas del agua, el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero; censo de aprovechamientos; recarga y sus componentes; salidas horizontales y extracción por bombeo.

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., elaborado 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 Guadalupe Garzarón, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles, determinar la recarga media anual y las componentes de balance de agua subterránea.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROLÓGICA Y DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS EL CARDITO Y GUADALUPE GARZARÓN, ZACATECAS, elaborado 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, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la transición de dos Provincias Fisiográficas. Una pequeña zona en la región norte del acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica V “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 y el resto del acuífero corresponde a la Provincia Fisiográfica IX “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), la zona que corresponde al área del acuífero se localiza en las Subprovincias Sierras Transversales y Sierras y Lomeríos de Aldama.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación del INEGI, en el territorio que cubre el acuífero predominan 4 tipos de clima: el clima seco templado, que predomina en la mayor parte del acuífero, cubriendo desde la zona sur e incluyendo la parte centro norte; el clima semiseco templado, ocupa el segundo lugar, cubriendo la parte norte hasta los límites del acuífero; el clima seco semicálido, el cual cubre una franja localizada en la zona noroeste del acuífero; y el clima muy seco semicálido; ocupa una pequeña extensión en la región oriental, en los límites del acuífero.

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 Sifuentes, Sierra Hermosa, San Andrés, La Victoria, San Tiburcio, Mazapil, Agua Nueva, Cedros y Nuevo Mercurio, cuyo registro comprende un periodo de 19 años (1987-2006). Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **339.8 mm** y **16.5°C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2087 mm anuales**.

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. Los valores extremos se registraron en 2003 (521.9 mm) y 1999 (137.7 mm).

3.3. Hidrografía

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

Esta región hidrológica queda 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. Limita al oriente con las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. La región se caracteriza por presentar una serie de llanuras desérticas, en general por el escurrimiento superficial de muy corta longitud, ya que se infiltra en las rocas calizas que conforman las sierras y en los piedemonte. En las planicies los escurrimientos desaparecen por evaporación. Localmente, en el área de la cuenca donde se ubica el

acuífero, existen algunas corrientes como el Arroyo Seco, San Felipe, El Muerto y Salitrillo, los cuales desaparecen en distancias relativamente cortas.

3.4. Geomorfología

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, Auras, El Borrado y El Mimbres cuya elevación varía de 2150 a 2300 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 dendrítico. Los fenómenos cársticos se presentan de manera aislada y se manifiestan con la presencia de algunas cavernas de disolución.

4. GEOLOGÍA

La geología general emplazada en la región que comprende el acuífero está integrada por un gran paquete de material aluvial del Cenozoico, acompañado de rocas sedimentarias e ígneas intrusivas y volcánicas (figura 2). Con base en la información geológica superficial del Servicio Geológico Mexicano, se identifican 13 unidades litológicas, de las cuales en el acuífero afloran tobas ácidas, limolita-arenisca, granodiorita, conglomerados, caliza y depósitos aluviales (Carta Geológica-Minera G14-C71 "El Cardito", Zacatecas. Esc. 1:50,000, 1997).

Dentro de la zona, las rocas más antiguas se encuentran representadas por un conjunto de rocas bandeadas del Triásico, las cuales pertenecen a dos formaciones litoestratigráficas principales: La Formación Taray, constituida por una alternancia de filitas y grauvacas de edad Triásico Medio-Superior; que cubren a la Formación Rodeo. Encima de la Formación Taray se encuentra la Formación Nazas del Triásico Superior-Jurásico Inferior, constituida por lavas andesíticas, riolitas, areniscas y limonitas.

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

Al Eoceno-Plioceno pertenece un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados de areniscas y rocas volcánicas de composición riolítica, areniscas y limos semiconsolidados. Al Cuaternario corresponden aluviones de diversa granulometría, producto erosivo de las rocas preexistentes que cubren parcialmente a todas las formaciones ya descritas.

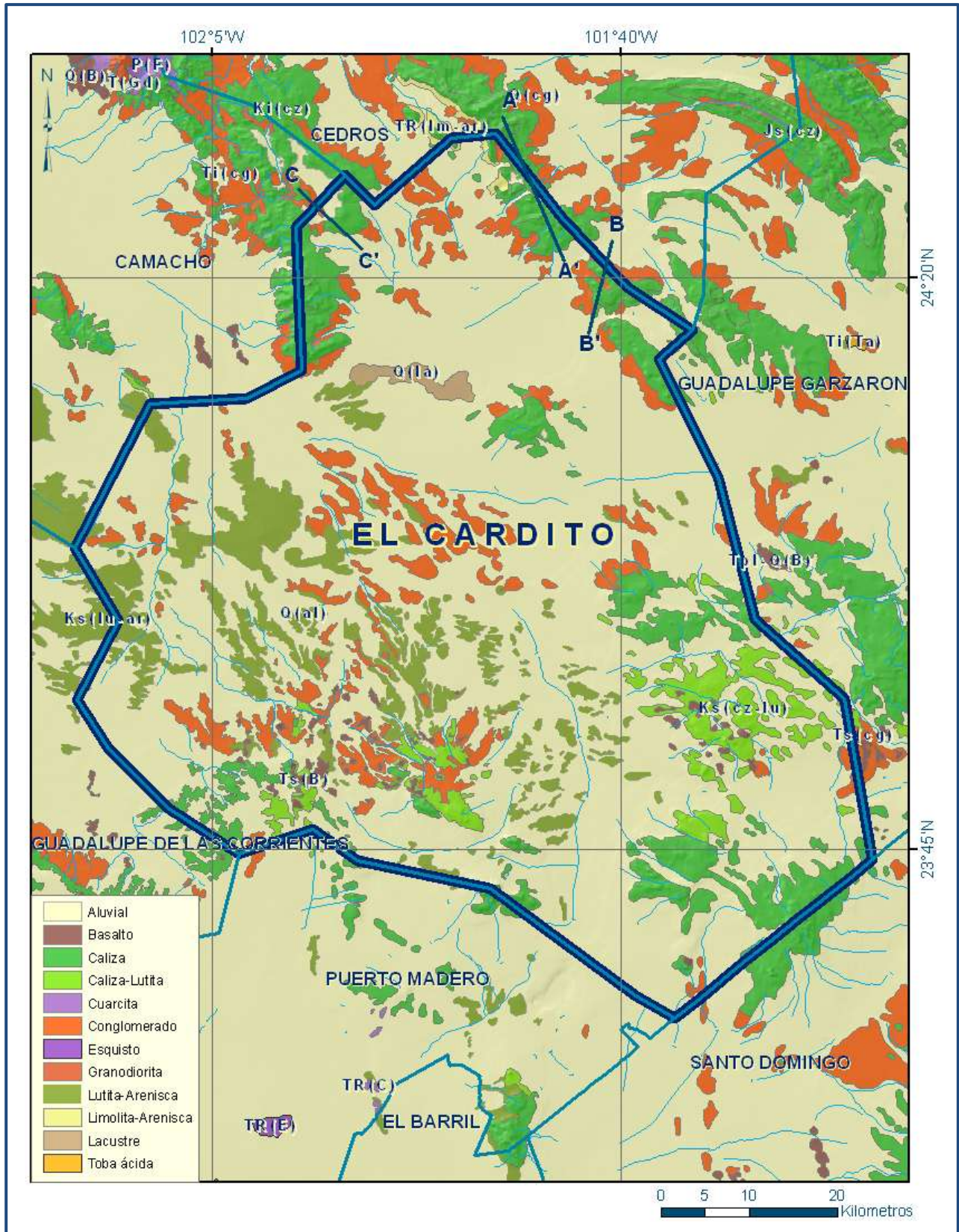


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Paleozoico al Reciente, distribuidas en la Sierra Madre Oriental (Carta Geológica-Minera G14-C71 “El Cardito”, Zacatecas. Esc. 1:50,000, 1997). Sin embargo, aunque no afloran todas las unidades de la estratigrafía regional, a continuación se describen de la más antigua a la más reciente:

PALEOZOICO

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.

TRIÁSICO

Formación Nazas

También conocida como Formación Huizachal, aflora en la Sierra de San Julián, de Teyra y en el Cerro Europa. Está cubierta generalmente por la Caliza Zuloaga. La Formación Nazas está constituida de limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo, parcialmente calcáreos, también incluye ocasionalmente material volcánico alterado, limolitas y areniscas de grano fino o cuarcita.

JURÁSICO

Formación La Joya

Esta formación 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 1200 m de espesor que consisten de conglomerados, areniscas, areniscas conglomeráticas, lutitas y limolitas de color rojo, ocasionalmente de color verde, de origen continental.

Formación Zuloaga

Descansa directamente sobre rocas del basamento. Se trata de 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 nódulos de pedernal pequeños de color negro. La Formación Zuloaga está cubierta en forma concordante por la Formación La Caja. Tiene un espesor aproximado del orden de 500 m.

Formación La Caja

Aflora en la mayoría de las sierras plegadas, consiste de limolita calcárea y en menor proporción calizas, pedernal, fosforita y lutita. Aflora generalmente en estrechas bandas paralelas, que flanquean a la Caliza Zuloaga, en los núcleos anticlinales. 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.

CETÁCICO

Formación Taraises

Está constituida de calizas con cantidades menores de limolita, que descansan sobre los 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.

Formación Cupido

Aflora en casi todas las sierras que existen en la región de Ixtlera, formando crestas y salientes. Está constituida de calizas de aguas profundas, muy resistentes y homogéneas, de espesor medio a grueso y colores claros. Se caracteriza por presentar estilolitas y en ocasiones algunos nódulos y lentes de pedernal color gris. En algunas localidades presenta intercalaciones de limolita calcárea y lutita en cantidades menores. Su espesor medio es de 300 m.

Formación La Peña

Su espesor es reducido y está cubierta por la caliza Cuesta del Cura. Su porción inferior y media está constituida por calizas compactas, dispuestas en capas medias y gruesas, alternada con limolitas poco cementadas. La caliza es de color gris claro y oscuro y en ocasiones presenta pedernal, mientras que la limolita es calcárea, suave, deleznable, de color amarillento y gris. La parte superior de la formación, consiste de capas delgadas y lamosas de caliza color gris claro y de algunas capas medianas a gruesas con lentes delgados, de pedernal negro. El espesor de la formación es de 60 m.

Formación Cuesta del Cura

Esta formación también se conoce como Caliza Cuesta del Cura, se encuentra aflorando en casi todas las sierras mencionadas, formando las laderas de los cerros. Está constituida de caliza laminar de estratificación ondulada, color gris oscuro y contiene numerosas lentes y nódulos de pedernal negro. En la Zona de Ixtlera, Zacatecas tiene un espesor del orden de 300 m.

Formación Indidura

Se localiza aflorando en las sierras El Calvario, Sombreretillo, Trébol y Concepción del Oro, descansando sobre la Formación Cuesta del Cura y cubierta por la Formación Caracol. Generalmente aparece aflorando en las laderas de las sierras; consiste principalmente de dos series diferentes que están formadas, en la parte inferior, de calizas arcillosas dispuestas en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea 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. Su espesor total promedio es de 200 m.

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. Su espesor aproximado es de 300 m.

TERCIARIO

Conglomerado y Arenisca

Unidad litológica de edad correspondiente al Eoceno representada por un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados de areniscas, guijarros de caliza, pedernal y rocas volcánicas de composición riolítica, así como areniscas y limos semiconsolidados.

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.

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.

Sedimentos Lacustres

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

4.2. Geología estructural

La 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. A partir del oeste, se pueden distinguir las siguientes Sierras y Llanuras: 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 sierras presentan características estructurales diferentes: La Sierra de Guadalupe Garzarón, localizada al oriente del acuífero, es una sierra plegada con orientación NW-SE que está intrusionada por un macizo de tipo monzonítico. La porción occidental de esta sierra está cortada por una falla cuya orientación es la misma que la de la sierra.

En la porción central se localizan las Sierras El Carpintero, La Caja, Santa Rosa y Santa Rita, cuyas características estructurales, pertenecen a anticlinales de orientación E-W, separados por pequeñas llanuras, que corresponden a sinclinales rellenos de sedimentos. Las Sierras La Caja y Santa Rosa han sido afectadas por numerosas fallas paralelas al rumbo de las capas, intrusionadas por cuerpos de composición granodiorítico y coronadas por derrames volcánicos. Este conjunto de sierras transversales, está limitado al oriente y al poniente por el Bolsón San Carlos y el Bolsón Cedros, respectivamente.

Hacia el poniente se presenta el Cerro Europa y las Sierras San Julián, Teyra, Gruñidora, Candelaria y Tanquecillos. La porción norte de este conjunto de sierras presenta condiciones estructurales bien definidas ya que se trata de un homoclinal con orientación NW-SE, que descansa directamente sobre rocas del basamento; mientras que en la porción sur, las sierras Gruñidora, Candelaria y Tanquecillos, tienen una estructura geológica complicada, pues los estratos cambian frecuentemente de posición, en respuesta a los plegamientos y al fracturamiento. Todo este conjunto está limitado hacia el oriente por el Bolsón San Simón.

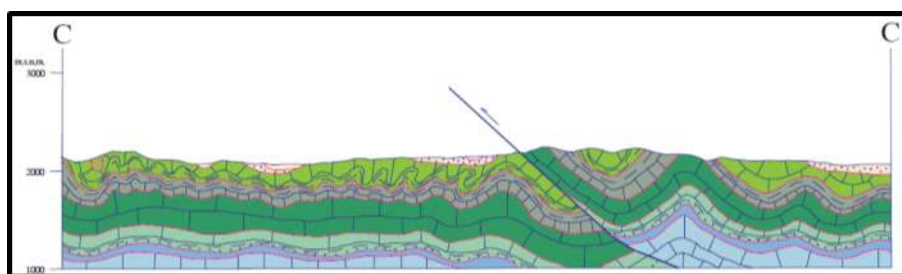
En general, se considera que los tres conjuntos de sierras mencionadas están limitados por fallas, que sólo son evidentes por los cambios morfológicos bruscos y por la posición estructural de las capas que presentan discontinuidades.

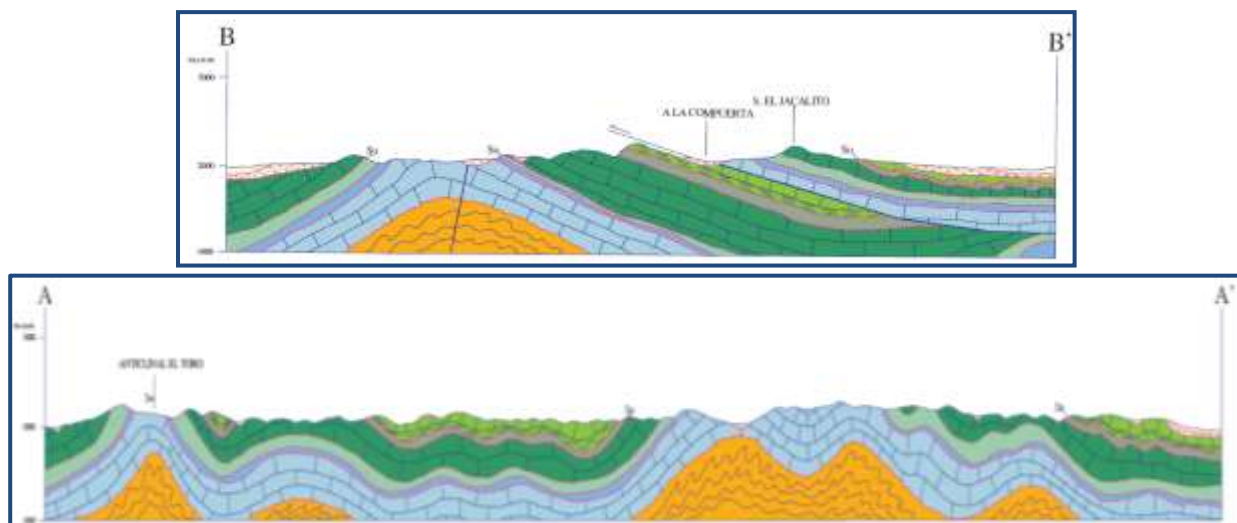
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares y los conglomerados paleógeno-neógenos 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 mayor profundidad, 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 (figura 3).

El espesor de este acuífero puede alcanzar los 300 m. 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 por las rocas ígneas intrusivas (granitos—dioritas), metamórficas (filitas y meta areniscas).





Fuente: Carta Geológica-Minera G14-C71 "El Cardito", Zacatecas. 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 en su porción superior por sedimentos aluviales, de granulometría variada, sedimentos lacustres y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en areniscas y lutitas fracturadas. A mayor profundidad, las calizas alojan un acuífero que puede presentar condiciones de confinamiento o semiconfinamiento debido a que están interestratificadas o sobreyacidas por lutitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2011, se realizaron 3 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos convencionales de Neuman, Theis y Jacob. Los resultados de su interpretación indican que los valores medios de transmisividad varían entre $1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y $2.21 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (13.3 a 190.9 m²/d), con un valor promedio de $8.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (73.5 m²/d). Los valores de conductividad hidráulica varían de 4.26×10^{-6} y $2.31 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.4 a 20.0 m/d), con un valor promedio de $8.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (7.3 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.

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 realizados en 2007 y 2011.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2011 muestra valores que varían de 5 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 se registran en la porción centro-norte del acuífero, hacia las localidades de San José, El Calabazal y Gruñidora; en tanto que los más profundos se presentan en los límites con los acuíferos Camacho, Guadalupe de Las Corrientes y Guadalupe Garzarón (figura 4).

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, se observa que los valores varían de 2120 a 1640 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 un cambio hacia el noroeste, hacia el poblado San Felipe Nuevo Mercurio, en donde se presenta una salida por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero vecino Camacho. En la región suroccidental, en los límites con el acuífero Guadalupe de Las Corrientes, se observan trayectorias sureste-noroeste y noroeste-sureste, que por efecto de la topografía se dirigen hacia el poblado Colonia Carrillo Puerto (figura 5).

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica consistente que permita elaborar la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en 2007 y 2011 muestran una gran dispersión espacial y valores inconsistentes, de tal manera que no fue posible realizar una configuración de evolución del nivel estático. Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2011 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

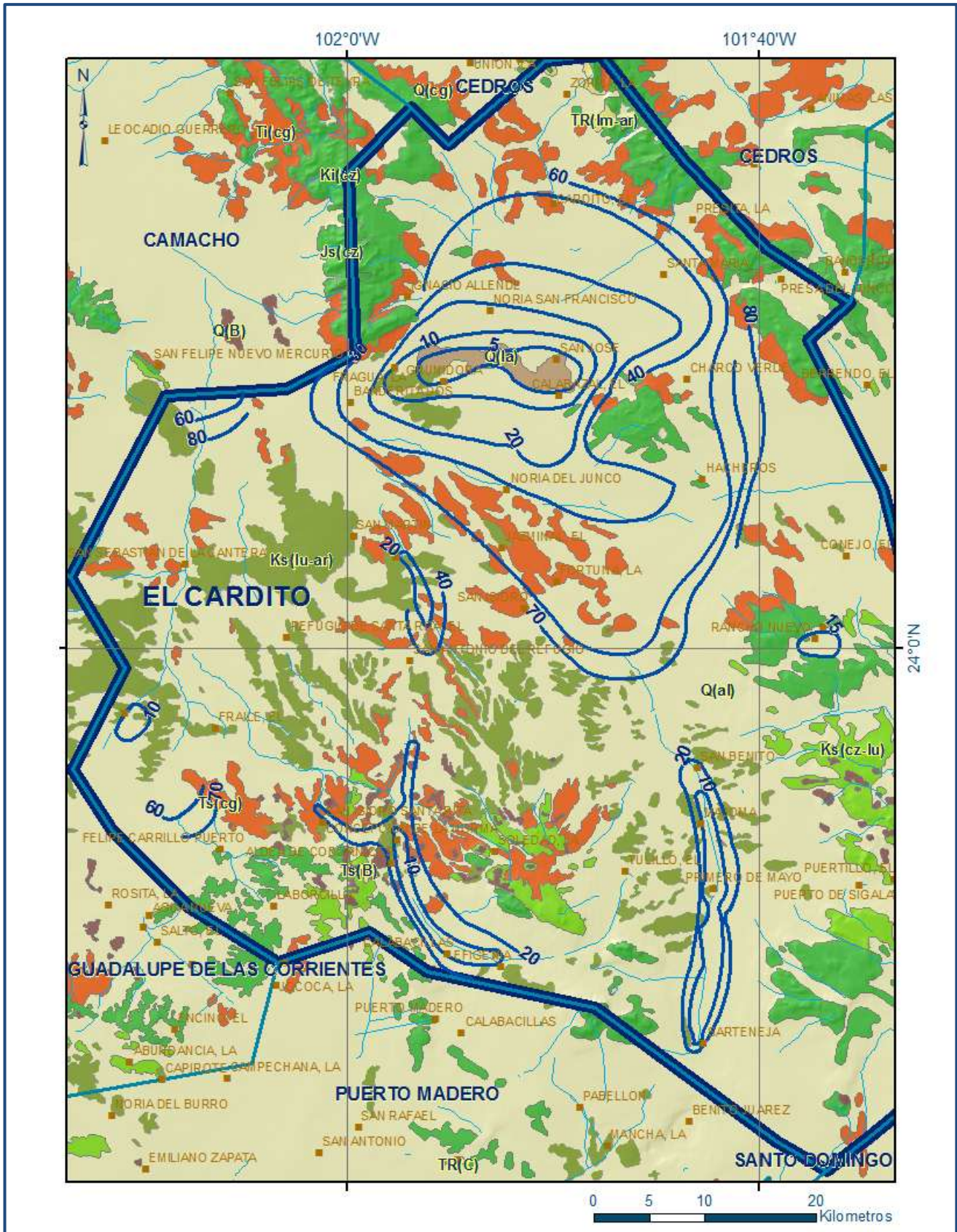


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2011)

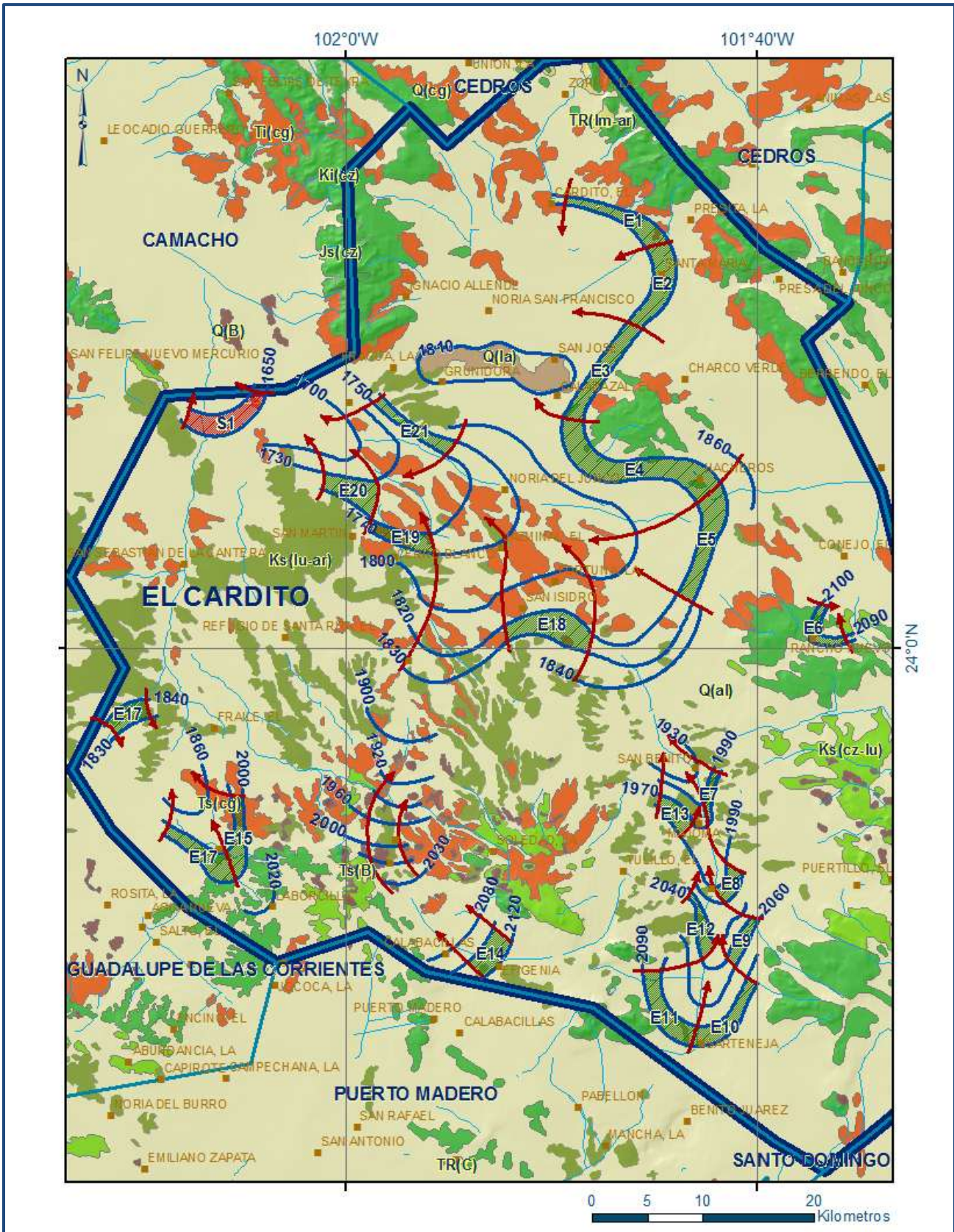


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (11 pozos, 7 norias y 2 manantiales), para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. 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 puede observar que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 210 a 3505 ppm, que en la mayoría de los casos superan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido por la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD, para el agua destinada al consumo humano.

De manera general, el agua del acuífero se clasifica como agua salobre, según la clasificación establecida por la APHA, ya que la mayoría de las muestras rebasan el límite para el agua dulce de $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$, el mayor valor es de $7827 \mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas varían de 15.3 a 24.1°C y el pH varía de 7.3 a 8.5.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, predominan las familias sulfatada-sódica, sulfatada-magnésica y bicarbonatada sódica; las dos primeras representan aguas más evolucionadas, que tuvieron intercambio iónico con las rocas que conforman el medio geológico, en tanto que la tercera representa al agua de reciente infiltración.

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, 2 se clasifican como C_4S_4 (muy alto contenido de sales y muy alta concentración de sodio intercambiable) que no son aptas para el uso agrícola, 8 se clasifican como C_4S_2 (muy alto contenido de sales y contenido medio de sodio intercambiable) para usarse en suelos permeables y con buen drenaje. Las 10 muestras restantes se clasifican como C_3S_1 (alto contenido de sales y baja concentración de sodio intercambiable) 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 2011, se registraron un total de 108 obras que aprovechan el agua subterránea: 71 pozos, 35 norias y 2 manantiales; del total de obras, 47 están activas y 61 inactivas.

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 uso público-urbano 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 2007-2011, en una superficie de **2231 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 la masa es la siguiente:

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas están 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 el acuífero (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, 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 inducida, 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 utilizados en riego son incipientes y no existen poblaciones urbanas importantes, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga inducida, por lo que **Ri = 0**.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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:

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

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal

B= Bombeo;

Ev= Evaporación;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

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

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

$$Rv = B + Ev + Sh - Eh \pm \Delta VS \quad (2)$$

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 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 2011, 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:

$$Q = T * B * i$$

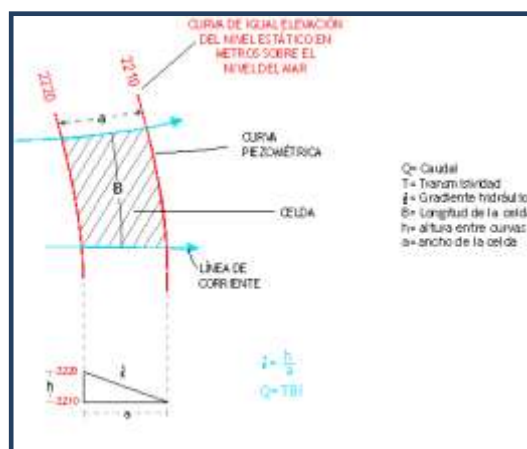
Donde:

Q = 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 **10.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B	ANCHO a	h_2-h_1	Gradiente hidráulico i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN (hm ³ /año)
	(m)	(m)	(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	
E1	8460	1925	10	0.005195	0.00020	0.0088	0.3
E2	8845	1730	10	0.005780	0.00020	0.0102	0.3
E3	8460	1540	10	0.006494	0.00020	0.0110	0.3
E4	15385	2305	10	0.004338	0.00020	0.0133	0.4
E5	9615	2690	10	0.003717	0.00020	0.0071	0.2
E6	5770	1155	10	0.008658	0.00020	0.0100	0.3
E7	3845	1155	20	0.017316	0.00015	0.0100	0.3
E8	4230	1540	10	0.006494	0.00015	0.0041	0.1
E9	5385	1540	20	0.012987	0.00015	0.0105	0.3
E10	8460	1540	10	0.006494	0.00015	0.0082	0.3
E11	7690	1150	10	0.008696	0.00015	0.0100	0.3
E12	4615	1540	20	0.012987	0.00015	0.0090	0.3
E13	3845	1540	20	0.012987	0.00015	0.0075	0.2
E14	5770	2310	20	0.008658	0.00020	0.0100	0.3
E15	5385	1540	20	0.012987	0.00020	0.0140	0.4
E16	7690	1920	20	0.010417	0.00020	0.0160	0.5
E17	3845	1920	10	0.005208	0.00020	0.0040	0.1
E18	7310	2310	10	0.004329	0.00020	0.0063	0.2
E19	5770	1540	20	0.012987	0.00020	0.0150	0.5
E20	5770	2310	20	0.008658	0.00020	0.0100	0.3
E21	8460	1150	20	0.017391	0.00100	0.1471	4.6
Total entradas							10.8

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, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por salidas de subterráneas horizontales (Sh) y a través de evaporación directa en las zonas de niveles freáticos someros (Ev). No existen descargas por flujo base (Dfb).

7.2.1. Bombeo (B)

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

7.2.2. Evaporación (Ev)

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973) (figura 6).

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 3 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción (2%) de la evaporación potencial media (2087 mm) obtenida de las estaciones climatológicas. El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático. De la figura 6 se deduce que para una profundidad al NE de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%.

Si consideramos que en una superficie de 60 km² se presentan niveles freáticos someros, donde la profundidad es menor a los 2 m, y un 2% de la evaporación potencial, la evaporación es de 2.5 hm³ anuales.

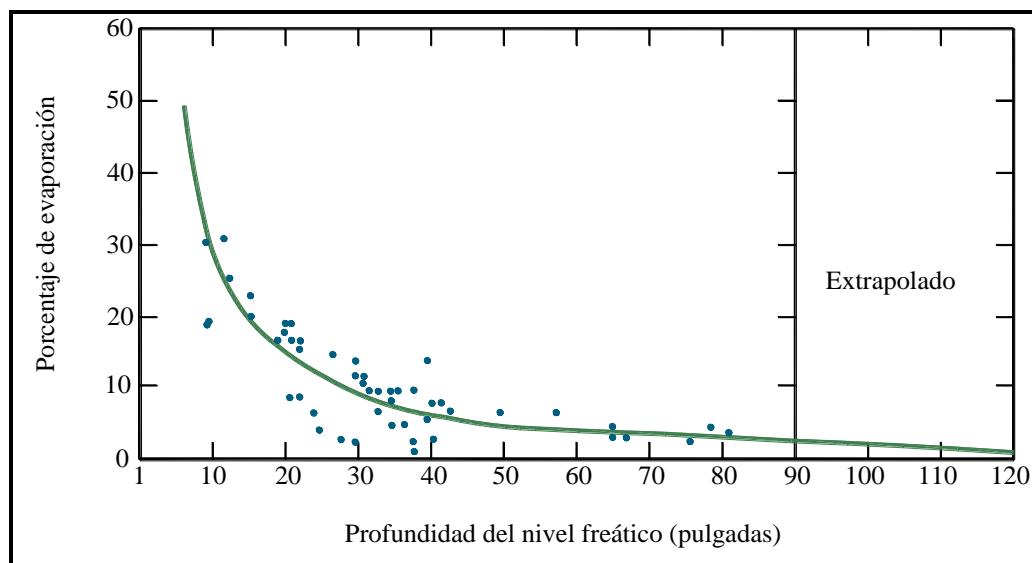


Figura 6. Evaporación del agua freática en función de la profundidad al nivel estático.

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km ²)	% de la evaporación potencial	Volumen de Evaporación (hm ³ /año)
2.087	60	0.02	2.5

7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático 2011, mostrada en la figura 5.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B	ANCHO a	h_2-h_1	Gradiente hidráulico i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)		(m ² /s)		
E1	7690	2310	10	0.004329	0.0020	0.0666	2.1
Total salidas							2.1

El valor total estimado de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **2.1 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no muestran consistencia, se registran valores extremos tanto positivos como

negativos en distancias relativamente cortas. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

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:

$$\begin{aligned}RV &= B + Ev + Sh - Eh \pm \Delta VS \\Rv &= 7.5 + 2.5 + 2.1 - 10.8 + 0.0 \\Rv &= 1.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas:

$$\begin{aligned}Rt &= Rv + Eh \\Rt &= 1.3 + 10.8 \\Rt &= 12.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero;

Rt = Recarga total media anual;

DNCOM = Descarga natural comprometida;

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso su valor es **12.1 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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, se considera que no existe descarga natural comprometida, por lo que **DNCOM = 0**.

8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS)

De acuerdo a la información existente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), el volumen concesionado de aguas subterráneas para este acuífero al **31 de marzo de 2013 es de 7'447,988 m³/año**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)

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, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS}$$

$$\mathbf{DAS = 12.1 - 0.0 - 7.447988}$$

$$\mathbf{DAS = 4.652012 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **4'652,012 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

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.

Comisión Nacional del Agua. 1999. Resumen de Condiciones Geohidrológicas en los Acuíferos del Estado de Zacatecas Ubicados Dentro de la Región Hidrológica Administrativa Cuencas Centrales del Norte. Gerencia Estatal Zacatecas.

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.

M3 Mexicana S. de R.L. de C.V., 2011. 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.

Servicio Geológico Mexicano, 1997. Carta Geológica-Minera G-14-C71 "El Cardito", escala 1:250,000.