CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO MATALOTES-EL ORO (1009), ESTADO DE DURANGO

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 5
3.1 Provincia fisiográfica 5
3.2 Clima 6
3.3 Hidrografía 7
3.4 Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 8
4.1 Estratigrafía 11
4.2 Geología estructural 17
4.3 Geología del subsuelo 18
5. HIDROGEOLOGÍA 19
5.1 Tipo de acuífero 19
5.2 Parámetros hidráulicos 19
5.3 Piezometría 20
5.4 Comportamiento hidráulico 20
5.4.1 Profundidad al nivel estático 20
5.4.2 Elevación del nivel estático 21
5.4.1 Evolución del nivel estático 22
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 24
7. BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA 24
7.1 Entradas 25
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 25
7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh) 26
7.2 Salidas 27
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 27
7.2.2 Evapotranspiración (ETR) 27
7.2.3 Bombeo (B) 28
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 29
8. DISPONIBILIDAD 29
8.1 Recarga total media anual (R) 30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 31
9. BIBLIOGRAFÍA 32

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 Matalotes-El Oro, definido con la clave 1009 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción noroccidental del Estado de Durango, entre las coordenadas 25° 32' y 26° 31' latitud norte y 105° 10' y 106° 21' longitud oeste; abarcando una superficie de 7,574 km^2. Limita al norte con los acuíferos Cabrera-Ocampo y Providencia, al sur con Galeana-Quemado y Tepehuanes-Santiago, al este con Buenos Aires y Cabrera, todos ellos pertenecientes al estado de Durango; en tanto que al oeste con los acuíferos Bocoyna, del estado de Chihuahua, y Río Culiacán, perteneciente al estado de Sinaloa (Figura 1).

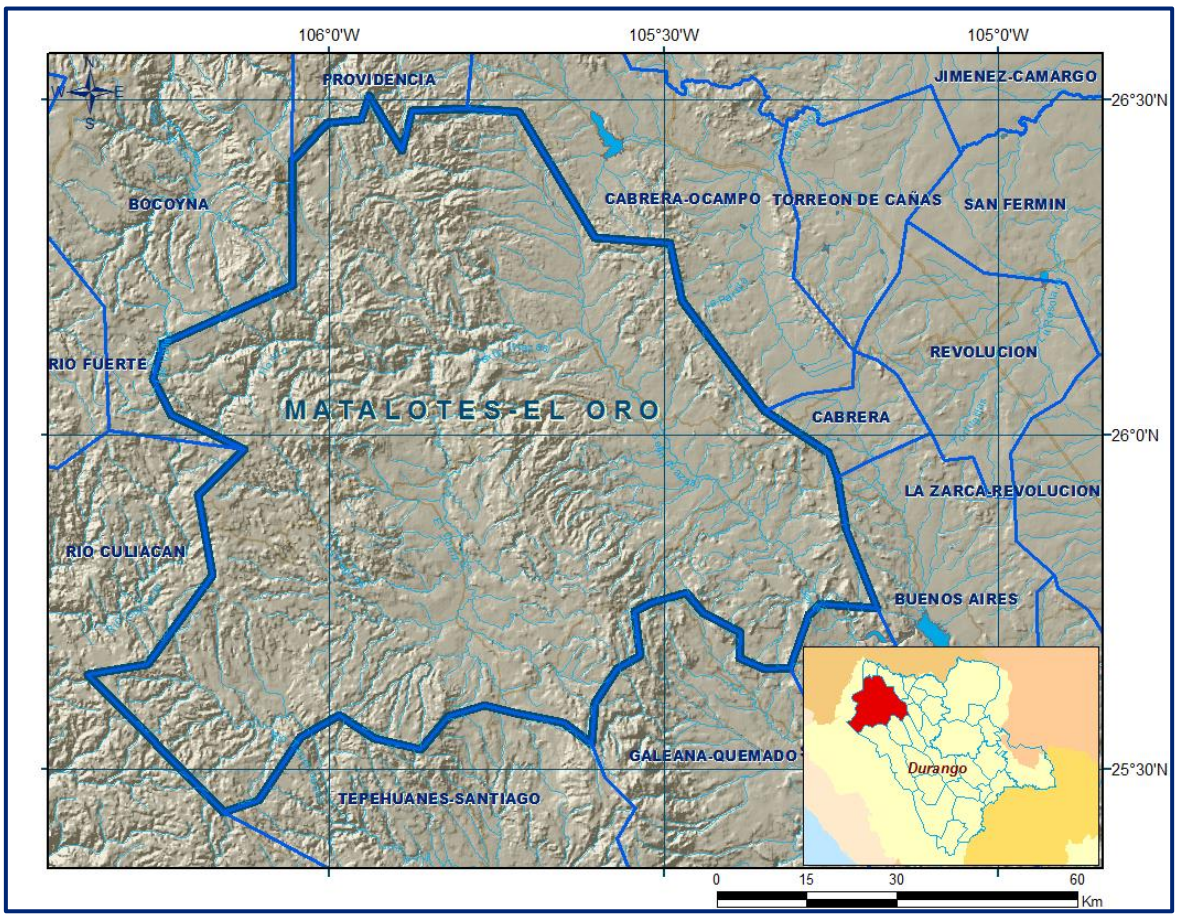


Figura 1Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero se comprende casi en su totalidad el municipio de San Bernardo y parcialmente los municipios, Guanaceví, Tepehuanes y El Oro.

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

Figura 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1009 MATALOTES-EL ORO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	105	53	33.1	26	25	28.0
2	105	52	34.7	26	29	0.9
3	105	47	37.3	26	29	11.3
4	105	42	58.7	26	28	56.7
5	105	36	9.7	26	17	40.6
6	105	29	31.2	26	17	6.8
7	105	28	22.3	26	12	2.5
8	105	20	55.7	26	2	8.2
9	105	15	13.4	25	58	20.1
10	105	14	26.0	25	56	8.7
11	105	13	41.6	25	51	27.2
12	105	10	51.1	25	44	23.0
13	105	15	58.5	25	44	47.5
14	105	17	0.6	25	43	46.9
15	105	18	42.0	25	39	3.5
16	105	20	56.4	25	38	56.0
17	105	23	14.1	25	39	59.8
18	105	23	9.9	25	42	15.2
19	105	26	29.0	25	43	59.9
20	105	28	2.3	25	45	45.8
21	105	31	10.7	25	44	56.4
22	105	32	37.4	25	44	5.7
23	105	32	6.9	25	40	12.7
24	105	34	14.7	25	38	57.6
25	105	36	12.2	25	35	57.0
26	105	36	27.9	25	32	13.4
27	105	38	58.3	25	34	8.3
28	105	43	18.1	25	35	0.8
29	105	46	4.4	25	35	44.6
30	105	49	20.0	25	34	43.3
31	105	51	50.8	25	31	47.3
32	105	55	56.8	25	32	46.2
33	105	59	6.1	25	34	52.4
34	106	2	38.5	25	32	48.3
35	106	6	19.3	25	27	11.8
36	106	9	30.4	25	26	8.5
37	106	21	40.7	25	38	31.4
38	106	16	20.4	25	39	22.2
39	106	10	30.8	25	47	22.5
40	106	11	48.5	25	54	33.4
41	106	7	41.3	25	58	40.6
42	106	14	7.7	26	1	43.8
43	106	15	51.0	26	4	56.7
44	106	14	54.7	26	8	10.0
45	106	3	17.9	26	13	22.4
46	106	3	23.8	26	24	24.8
47	106	0	14.9	26	27	57.7
48	105	57	9.1	26	28	12.9
49	105	56	28.4	26	30	24.4
1	105	53	33.1	26	25	28.0

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VII "Cuencas Centrales del Norte" y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Durango. Su territorio completo no se encuentra sujeto a ninguna veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

El usuario principal del agua subterránea es el agrícola. Dentro de los límites del acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, sólo algunos con fines de prospección minera. En algunos acuíferos vecinos se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILDAD DE LOS ACUÍFEROS CABRERA-OCAMPO, MATALOTES-EL ORO, SAN JOSÉ DE NAZARENO, GALEANA-EL QUEMADO, LA VICTORIA, BUENOS AIRES, TORREÓN DE CAÑAS, SAN FERMÍN, SAN JUAN DEL RÍO, CABRERA, LA ZARCA-REVOLUCIÓN Y REVOLUCIÓN, EN EL ESTADO DE DURANGO,elaborado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON), para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental.

Su porción noroccidental se ubica en la Subprovincia Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses; la porción sur y occidental dentro de la Subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses; en tanto que su porción oriental se localiza en la Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango.

Esta provincia fisiográfica abarca parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene sus orígenes en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1500 y 1800 m. En ella predominan rocas ácidas (ricas en sílice) e intermedias (contenido medio de sílice).

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la superficie cubierta por el acuífero, de oeste a este, se presenta una variación de climas templados a climas secos esteparios. Los primeros son los que predominan, en las variedades: C(E)(w_1), C(E)(w_2), C(w_0) y C(w_1); en tanto que los climas secos se presentan como BS_1kw(w) y BS_1kw.

Los climas templados se presentan principalmente en la mitad oeste del acuífero, donde el clima C(w_0) es el que predomina. Este clima es de tipo subhúmedo (w), con régimen de lluvias de verano y escasa precipitación el resto del año o de invierno. El subtipo (0) corresponde con el menos húmedo, pues su cociente entre precipitación y temperatura es menor de 43.2. Su porcentaje de lluvia invernal se encuentra entre 5 y 10.2, la precipitación del mes más seco es < 40 mm y su temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18°C.

En clima C(w_1) comparte las mismas características, variando solo en el grado de humedad, que en este caso es medio, de modo que su cociente precipitación/temperatura se encuentra entre 43.2 y 55.0.El clima C(E)(w_2) es el segundo que predomina de los climas templados. Es semifrío, de tipo subhúmedo y corresponde con el más húmedo, pues su grado de humedad es mayor que 55.0. Su régimen de lluvias es de verano, con un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10. La precipitación en el mes más seco <40 mm y la temperatura media anual entre 5 y 12 °C.

El clima C(E)(w_1) presenta las mismas características, pero a diferencia del clima anterior, el término (1) indica que su humedad es media, lo que implica un cociente precipitación/temperatura entre 43.2 y 55.0. Este se presenta en una pequeña zona en la porción central del acuífero.

Los climas secos se manifiestan en las porciones central [$BS_1kw(w)$] y en la mitad este (BS_1kw) del acuífero. Ambos son de tipo estepario (BS), que es el menos seco de los secos.

El subtipo es semiseco ($_1$), el cual presenta un grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas media anual del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido. Presenta una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la media del mes más frío se encuentra entre -3 y 18 °C y la del más cálido es > 18 °C.

El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año indica que la temporada en la que se concentra la mayor cantidad es de verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año.

En el caso del clima $BS_1kw(w)$, que es el predominante en el acuífero, el último término indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es < 5.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de once estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Cendradillas, Ciénega de Escobar, El Tarahumar, Guanaceví, Pánuco de Coronado, Rosario,San Bernardo,Sardinas, Santa María del Oro Indé, El Zape y General Escobedo; cuyos registros comprenden los periodos:1961-2008,1965-2007, 1964-2007, 1922-2007, 1967-2007, 1965-2008, 1977-2007, 1970-2007, 1979-2007, 1978-2007, 1978-2007, respectivamente.

De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **585.1 mm y 15.0°C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1679 mm anuales.**

3.3 Hidrografía

El acuífero Matalotes-El Oro se ubica en la Región Hidrológica 036, Nazas-Aguanaval, Cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas, Subcuenca del Ríos Ramos y del Oro. Esta Región se encuentra situada al norte del país, en la altiplanicie septentrional; ocupando porciones de los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas.

Está comprendida entre los meridianos 101°31' y 106°14' de longitud oeste, y los paralelos 22°39' y 26°35' de latitud norte, abarcando una superficie de 89,239 km^2**;** limita al norte con la región hidrológica 35, al noroeste con la región hidrológica 24c, al este con la región hidrológica 37, al sur con la región hidrológica 12, al suroeste con la región hidrológica 11, al oeste con la región hidrológica 10, y al noroeste con la región hidrológica 24a. Los ríos más importantes en la región son el Nazas, el cual nace en el estado de Durango, y Aguanaval, que nace en el estado de Zacatecas. Localmente, el acuífero Matalotes-El Oro se encuentra ubicado en la cuenca del río Sextín del Oro, aguas arriba de donde se localiza la Presa Lázaro Cárdenas.

3.4 Geomorfología

La superficie total del acuífero se ubica en la Sierra Madre Occidental, la cual se levanta hasta los 2,500 o 3,000 msnm; presenta hacia el occidente un importante escarpe, en tanto que hacia el oriente desciende gradualmente a las regiones llanas del centro. En esta franja oriental se presentan cadenas y valles orientados en sentido NE-SW, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento ocurridos durante el pleistoceno. Sobre el dorso central de la sierra los materiales volcánicos se encuentran en amplios mantos tendidos que conforman las elevadas mesetas que son típicas de la provincia. Una particular conjunción de actividad tectónica, rasgos litológicos, distribución de fracturas y procesos erosivos hídricos propició la excavación de profundos cañones cuyos ejemplos más espectaculares se presentan sobre las vertientes occidentales de la sierra.

4. GEOLOGÍA

Las rocas y secuencias que afloran en el área cubierta por el acuífero presentan una complejidad litológico-estructural muy importante, cuyo origen está asociado a diversos procesos geológicos que se han sucedido en esta porción de la República Mexicana (Figura 2).

Es importante establecer que el estado de Durango se ubica morfo tectónicamente justo en la transición entre el dominio geográfico de la Sierra Madre Occidental y el dominio geográfico de la Plataforma Coahuila (López-Ramos, 1981; Eguiluz de Antuñano y Campa-Uranga, 1982).

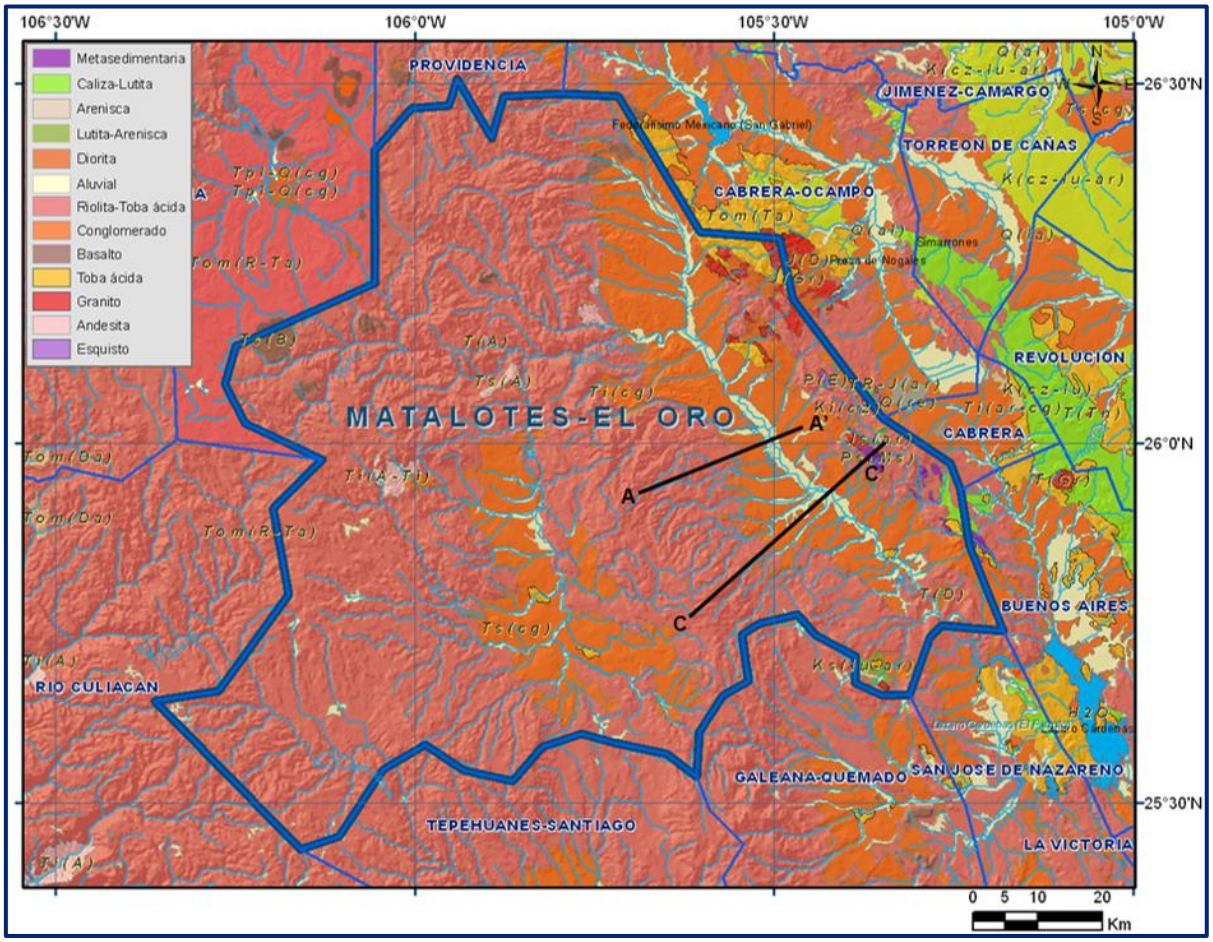


Figura 2. Geología general del acuífero

En este contexto, las litologías presentan una mezcla de evidencias geológico-estructurales que obedecen principalmente a la sobreposición de diversos ambientes tectónicos.

En la región cubierta por el acuífero se encuentran expuestas rocas metamórficas de edad Carbonífero al Jurásico Superior, así como rocas sedimentarias del Berriasiano al holoceno, rocas ígneas extrusivas de edad Paleógeno-Neógeno y el emplazamiento de cuerpos intrusivos del Jurásico Superior al Paleógeno (Carta geológica –Minera G13-C18 “Santa María del Oro”). Las rocas metamórficas pertenecen a la Formación Gran Tesoro, que en esta región se puede separar en tres paquetes distintos. El primero está formado por esquistos de muscovita y cuarcita a las que Araujo M. y Arenas P. (1981) les asignan una edad correspondiente al Carbonífero Superior.

El segundo yace sobre el primero y está conformado por bloques de calizas con fósiles del Pensilvánico Medio. El tercer paquete se encuentra debajo de los anteriores y por medio de una superficie de corrimiento.

Es una secuencia vulcanosedimentaria que consta de un conjunto de rocas metavolcánicas con estructura almohadilladas, filitas con bandas finas de sericita en forma de microcristales tabulares y pizarras negras con aspecto carbonoso, las cuales por medio de estudios palinológicos (Aranda M. y colegas, 1988) determinan una edad Jurásico Temprano. Sobreyaciendo por medio de una discordancia erosional a las unidades metamórficas anteriores, se presenta el Grupo Mezcalera, conformado por un primer miembro de conglomerado polimíctico de fragmentos de esquistos, pizarras y filitas, que alternan con areniscas de estratificación mediana a fina, que cambian verticalmente de facies aun horizonte de calizas de color gris oscuro, de estratificación gruesa. Sobre esta unidad en contacto concordante, se desarrolla un paquete de areniscas y limolitas, en estratos delgados a laminares, las cuales en la carta Indé fueron datadas por su contenido de microfauna, ubicándolas Valanginiano-Hauteriviano.

Descansando en discordancia sobre las unidades mencionadas, se presenta la Serie Volcánica Inferior del Eoceno-Oligoceno. Consiste de un paquete de andesitas y dacitas de coloración gris oscuro, que está afectada por diques porfídicos andesíticos y dacíticos, con edades de K-Ar del Cretácico Tardío al Oligoceno. Suprayaciendo discordantemente a estas rocas, existe un conglomerado polimíctico de color rojizo, que pertenece a la Formación Ahuichila, constituido por fragmentos de caliza de tamaños de cantos rodados a guijarros de esquistos, granito y lutitas, en una matriz arenosa y limosa.

En la región de Santa María del Oro aflora un cuerpo intrusivo de composición granítica que varía a diorita. Por relación de campo este cuerpo se interpreta polifásico ya que se presentan clastos de él en el conglomerado Ahuichila y al oriente e Magistral se observa intrusionando a las andesitas de la Secuencia Volcánica Inferior. Damon reporta una edad jurásica para este magmatismo. Descansando sobre el conglomerado existe la Serie Volcánica Superior de edad Oligoceno-Mioceno, conformada por ignimbritas, tobas riolíticas, domos riolíticos y brechas riolíticas, que se presentan en forma de de capas de flujos de cenizas soldadas, intercaladas por pseudoestratos de tobas riolíticas, brechas, tobas de caída libre, todas ellas cubriendo a las rocas volcánicas más antiguas. Las ignimbritas afloran en la mayor parte del acuífero, formando mesetas.

Suprayaciendo a la Serie Volcánica Superior, se depositaron clásticos continentales de edad Neógeno, constituidos por arenas y gravas, poco consolidadas, a conglomerados en ocasiones cementados por arcillas, limos y caliche. Se presentan como relleno de la semifosa del río Sextín, el cual en su cauce presenta depósitos aluviales.

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía está representada por unidades litológicas cuyo rango de edad varía del Paleozoico al Reciente, que comprende rocas metasedimentarias, ígneas (intrusivas y extrusivas) y sedimentarias (figura 2). Se describen a continuación de acuerdo a su posición estratigráfica:

Paleozoico Superior

Formación Gran Tesoro

Son las rocas más antiguas de la región y están compuestas por micaesquistos, metalavas y calizas que fueron definidas formalmente en la localidad de Santa María del Oro. Aflora en el extremo noroeste del acuífero, sobre el Arroyo Pescaditos, en donde se reconoce una secuencia de esquistos de muscovita y augen gneis de facies de esquistos verdes intercalados, posiblemente en contacto tectónico con filitas de sericita, areniscas y meta andesitas.

La edad es del Carbonífero, definida con fenestélidos y crinoides en las calizas y por radiometría se dató el metamorfismo en los esquistos con método de K-Ar en muscovita.

Las rocas de esta unidad fueron descritas por primera vez por Russell R.W. (en Berumen E.R. y Pavón L.R. 1983) de manera informal, utilizando el nombre de Gran Tesoro y considerándolas de edad Permo-Triásico; posteriormente varios autores la mencionan y suponen la presencia del Paleozoico. Garduño M. y Zaldívar R. 1983, las consideran como base del conjunto petrotectónico Santa María.

El espesor mínimo propuesto por diversos autores que han estudiado el área, es de 150 m. Aflora en el extremo oriental del acuífero, hacia los límites con los acuíferos Cabrera y Buenos Aires.

Cretácico Superior

Grupo Mezcalera

En 1986, Araujo M. y Arenas P. la proponen de manera formal como Formación Mezcalera y en la hoja Indé (G13C19 escala 1:50,000) se definieron y cartografiaron cuatro unidades por lo que en términos del Código de Nomenclatura estratigráfico (1983) se conviene denominarla como Grupo Mezcalera. Está representado por una alternancia rítmica tipo flysch de areniscas y lutitas, cuyos afloramientos principales se ubican en las porciones suroriental y oriental del acuífero. Litológicamente está constituida por una secuencia rítmica de areniscas de grano fino y lutitas intercaladas con horizontes gruesos de calizas y limolita.

Como cambio de facies de esta secuencia, se presentan rocas calcáreas de la Formación Aurora (KaCz-Lu), constituida por calizas, dolomías, pedernal y horizontes arcillosos, que afloran en la sierra La Sierrita y al noroeste en los cerros Andrés y Sotoles.

Formación Aurora

El nombre Formación Aurora fue propuesto por Burrows (1910) para aquellas rocas que afloran en la porción noreste del estado de Chihuahua, donde están constituidas por capas gruesas de calizas fosilíferas, que presentan abundantes nódulos de pedernal.

Está constituida por calizas de estratificación media a gruesa con diversos desarrollos arrecifales y algunos horizontes de calcarenitas. Presenta una coloración de tonalidad gris a obscura, escasos nódulos de pedernal y hematita hacia la cima. Presenta fracturamiento general que varía de moderado a intenso, estructuralmente forma pliegues anticlinales cuyo eje se orienta al noroeste-sureste y echados suaves más o menos uniformes. Aflora en el extremo oriental del acuífero, hacia los límites con los acuíferos Cabrera y Buenos Aires.

Cenozoico. Paleógeno

Paleoceno-Oligoceno

Complejo Volcánico Inferior (TpaeA-BvA)

Es considerado de manera informal en el área de Tayoltita por Henshaw (1953), Randall y compañía Minas de San Luis (1975), posteriormente es estudiada sobre la carretera a Mezquital, Dgo. (Keizer, 1974) y sobre la carretera a Mazatlán por McDowell y Clabaugh (1976); los primeros autores la mencionan constituida por riolitas, toba andesítica y andesitas con un espesor de 800 m; en Topia, Dgo. Lemish (en Clark y otros, 1977), reporta un espesor de 1400 m en una alternancia de andesitas y tobas en la Sierra de Registro y Sierra Colorada al Suroeste de la Cd. de Durango.

La litología está constituida por andesitas y brechas andesíticas; megascópicamente las andesitas presentan una textura afanítica de color gris, gris claro, verde obscuro y rojiza; las brechas andesíticas están conformadas por fragmentos angulosos de andesitas y riolitas de pequeñas dimensiones de color variable con tonalidades de púrpura al gris claro.

Generalmente esta secuencia tiene la característica especial de presentarse en forma pseudoestratos de 50 a 1.5 m y se encuentra aflorando en forma de ventanas estructurales debido a la tectónica y a la erosión.

Se consideran espesores de hasta 700 m en la zona de Tayoltita y Bacís y espesores de 250 m en Tejamen, Alamito, Coneto de Comonfort y San Lucas de Ocampo. La andesita fue datada por el método de K-Ar en la localidad de San Lucas de Ocampo reportando una edad de 38.8 m.a. (Damon, 1975).

Se tiene otra datación en la carretera Durango - Mazatlán que arrojó una edad de 52 m.a. (McDowell y Clabaugh, 1976); por lo que la andesita queda ubicada en el Paleoceno - Eoceno Temprano a Tardío.

Esta unidad se encuentra aflorando de manera diseminada a lo largo de toda el área del acuífero, principalmente al norte del cerro Las Mangas, en los alrededores de las minas El Refugio y Tovar, al poniente del poblado de Santiago Papasquiaro, y en las inmediaciones de los poblados de La Lumbre y Tejamen. La litología predominante de este complejo en el área consiste de flujos de andesitas y brechas andesíticas de color gris morado. Las andesitas presentan una textura afanítica y generalmente con una alteración principalmente propilítica.

Los derrames de andesita y brechas andesíticas están compuestas por fragmentos de andesita con alteración clorítica a veces pseudoestratificada que presenta variación litológica a dacitas con espesor variable de 100 a 350 m. Principalmente la unidad está expuesta en forma de ventanas erosionales.

Oligoceno-Mioceno

Supergrupo Volcánico Superior (ToTR-Ig, TomIg-TR, TomRP)

Una extensa secuencia de ignimbritas intercaladas con flujos de lavas y sedimentos epiclásticos tobáceos sobreyacen el Complejo Volcánico Inferior y forman la capa superior de la Sierra Madre Occidental.

Esta gran acumulación de rocas volcánicas del Cenozoico Medio ha sido designada como el “Supergrupo Volcánico Superior” (McDowell y Keize, 1977). Éste es comparable con depósitos piroclásticos de flujo de cenizas y rocas asociadas de edad similar que cubren áreas amplias del occidente de los Estados Unidos (McDowell y Clabaugh, 1979).

En el occidente de México estos dos grupos ígneos ocupan áreas similares, y se pueden identificar a través de la mayor parte de la Sierra Madre Occidental. Ambos están aproximadamente paralelos a la margen occidental del continente.

La Sierra Madre Occidental es una gran región con elevaciones y depresiones topográficas que forman la margen occidental del altiplano central mexicano.

En la región de Durango está profundamente disectada por ríos que fluyen hacia el este y que descienden rápidamente al nivel del mar. La parte superior está compuesta por rocas volcánicas del Cenozoico Medio, donde se pueden apreciar ignimbritas riolíticas espectacularmente expuestas.

Ésta es probablemente la secuencia de ignimbritas continua más grande del mundo (McDowell y Clabaugh, 1979; Swanson y McDowell, 1984), distribuida en un cinturón con orientación sureste con aproximadamente 200-500 km ancho y al menos 1200 km de largo, extendiéndose desde la frontera de México con Estados Unidos, hasta su intersección con la provincia de la Faja Volcánica Trans-Mexicana. Las rocas dominantes en esta secuencia son ignimbritas riodacíticas a riolíticas con un grado de soldamiento de moderado a alto. Cantidades menores de rocas máficas están usualmente presentes hacia la cima de las secuencias (McDowell y Clabaugh, 1979).

Las rocas dominantes en esta secuencia son ignimbritas riodacíticas a riolíticas con un grado de soldamiento de moderado a alto. Cantidades menores de rocas máficas están usualmente presentes hacia la cima de las secuencias (McDowell y Clabaugh, 1979).

El Supergrupo Volcánico Superior fue emplazado durante un periodo de convergencia entre la placa Farallón y la placa Norteamericana (McDowell y Clabaugh, 1979; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991).

Este periodo de vulcanismo paroxístico ha sido relacionado con pulsos de extensión en la porción meridional de la provincia de Cuencas y Sierras (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991,1993; Aranda-Gómez *et al*., 2000).

Por otro lado, Nieto-Samaniego *et al*. (1999) consideran que el volcanismo silícico del "*flareup*" fue disparado por el efecto combinado de un emplazamiento extensivo de magmas básicos en la base de la corteza (*mafic underplating*) y el comienzo de extensión en la parte superior de la placa, inducida por el retroceso de la trinchera.

Haciendo un estudio comparativo con el campo volcánico de San Juan, McDowell y Clabaugh (1979) estimaron que para producir los más de 300,000 km^3 de rocas piroclásticas que forman la Sierra Madre Occidental (300,000 km^2 de área cubierta por este paquete de ignimbritas multiplicado por un espesor promedio de 1 km) deberían existir de 200 a 400 calderas con un diámetro promedio de 30 km.

Sin embargo, sólo se han reportado alrededor de 15 calderas (o complejos caldéricos) en la Sierra Madre Occidental, de las cuales solo unas cuantas han sido moderadamente estudiadas (Swanson y McDowell, 1984; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003).

Varios autores han propuesto que algunas de estas ignimbritas fueron emplazadas mediante fisuras corticales relacionadas a la formación de grabens (Scheubel *et al*., 1988; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003) llamados también "depresiones Vulcano-tectónicas" (Liman, 1997).

Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández (2003) y Aguirre-Díaz *et al*. (2005), Aguirre-Díaz *et al*. (2007, 2008) proponen la existencia de cámaras magnéticas alargadas de dimensiones bato líticas que formaron calderas alargadas dentro de los grabens, llamando a estas estructuras "graben-caldera".

Esta unidad presenta casi el 80% de los afloramientos litológicos dentro del acuífero. Están caracterizados por rocas volcánicas ácidas, tales como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e Ignimbritas.

Regionalmente, esta unidad incluye varias unidades caracterizadas por litologías volcánicas félsicas afines: a) tobas líticas con pequeños fragmentos de rocas hipabisales y volcánicas con pseudoestratificación de delgada a masiva, aflora en los flancos de la Sierra de Coneto, con un espesor aproximado de 186 m (Formación Ocampo); b) ignimbritas fluidales y vitrófidos pelíticos asociados a tobas y brechas riolíticas piroclásticas con contenido de calcedonia; su espesor varía de 50 a 100 m (Formación Alumbre); c) ignimbritas masivas con escasos fragmentos líticos, siendo más abundante en la cima, en su parte media contiene areniscas tobáceas con un espesor variable de 20 a 90 m (Formación El Salto); d) ignimbritas rosadas, moradas y rojizas con estructura fluidal y juntas columnares, con un espesor aproximado de 75 m (Formación Yerbabuena); y e) tobas brechoides y aglomeráticas de composición ácida con fragmentos de bloques a bombas envueltos en una matriz de ceniza litificada (Formación Trincheras).

Grupo Carpintero (ToIg-TR)

Esta unidad fue definida por Swanson et al. (1978) en la localidad del arroyo del Carpintero, al NW de la ciudad de Durango, relacionándolo con la Formación de la Caldera de Chupaderos.

Consiste de las Formaciones El Águila, Cacaria y Santuario, además de una serie de domos y estructuras tipo plugs latiticos, traquíticos y riolíticos, rocas volcánicas ácidas como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e ignimbritas.

La edad de esta unidad se tiene en el Oligoceno Medio, a partir de datación radiométrica por el método K-Ar de 28.3 Ma a 31.4 Ma.

Granodiorita (TeGd)

Está representado por cuerpos ígneos de composición granítico a granodiorítico que se encuentran intrusionando al grupo Mezcalera en la porción nororiental del acuífero, entre los límites de éste y el acuífero Cabrera-Ocampo.

Formación Metates (TmB)

Definida como unidad informal por Córdoba (1963) en las inmediaciones del poblado de Metates en el km 20 de la carretera Durango-Mazatlán.

Litológicamente está constituido por basaltos alcalinos caracterizados por un color gris oscuro a pardo rojizo, textura vesicular a amigdaloidal con relleno de calcita y olivino. Las edades reportadas para estos basaltos se tienen entre 11.7 y 12.6 Ma, ubicándolos en el Mioceno.

Formación Ahuichila

Definida formalmente por Rogers (1981), en los afloramientos expuestos en el "Frontón de Ahuichila", ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas, está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenitas, calculadita y de rocas volcánicas, con matriz calcárea y limo lítica, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris al rojizo. Debido a su posición estratigráfica y su origen, el cual se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia Laramie, su edad se considera del Eoceno-Oligoceno.

Cuaternario

Conglomerado polimíctico Formación Santa Inés (TnCgp)

Fue propuesto por E. de la Vega (1968) para designar a depósitos clásticos continentales que afloran al surponiente y suroriente de Cuencamé, Durango, con un espesor de 5 a 30 m. Consiste de clastos de roca volcánica ácida subredondeados a subangulosos del tamaño de guijas finas a cantos rodados medianos que varían de no consolidados a bien cementados, en una matriz de grava y arena. La litología consta de fragmentos líticos de rocas volcánicas ácidas como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e ignimbritas con un grado de esfericidad de subredondeado a subanguloso, mal clasificados, con diámetros variables de 1 a 40 cm, semicompactos a cementados en una matriz arenosa, constituyendo en ocasiones estratificación mientras que en otros sitios se encuentran en forma caótica.

Por la similitud litológica y relación estratigráfica que se aprecian, estos depósitos se correlacionaron con la Formación Los Llanos, asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

Depósitos fluviales (Qhoal)

Constituyen grandes acumulaciones de material de origen fluvial, producto de la intensa erosión de las formaciones volcánicas cenozoicas y cuaternarias con su posterior transporte y depósito, lo cual ha originado la formación de planicies aluviales y lacustres. Esta unidad queda restringida a las márgenes y lechos de ríos y arroyos.

Constituida por gravas, arenas, arcillas y limos no consolidados, mal clasificados, de composición variada, observándose principalmente clastos redondeados de tobas, riolitas, basaltos, conglomerados y ocasionalmente rodados de la Formación Mezcalera.

4.2 Geología estructural

Los eventos tectónicos de los que se tiene registro para este rango de edades en la región corresponden principalmente a aquellos relacionados con: a) el desarrollo de una cuenca mesozoica asociada a la apertura del Golfo de México (Rueda-Gaxiola, 2004), b) un proceso de subducción a lo largo de la margen pacífica de Norteamérica desde el Mesozoico y hasta el Cenozoico Tardío (Ferrari et al., 2005), c) la presencia de un evento compresivo en el marco de un ambiente de retro-arco a finales del Cretácico e inicios del Cenozoico (Eguiluz de Antuñano et al., 2000).
Y d) la distensión cortical asociada a la provincia extensional del Basin and Range (Henry y Aranda-Gómez, 1992).

La secuencia de rocas metamórficas presenta 2 etapas de deformación, la primera debida a ala Orogenia Antieriana (Córdoba D. y Silva L, 1990) la cual plegó y metamorfizó al basamento (Formación Gran Tesoro), originando pliegues orientados en sentido E-W.

El segundo evento corresponde a la Orogenia Laramide que ocasionó una segunda fase de deformación del basamento y a la Formación Mezcalera, con pliegues orientados en sentido NW-SE y vergencia al NE, lo que originó pliegues isoclinales y cabalgaduras, y finalmente una etapa distensiva caracterizada por la presencia de fallamiento normal orientado NNW, que de manera general reutiliza las superficies de cabalgaduras laramídicas, dando como consecuencia la formación de la morfología de Cuencas y Sierras.

La Orogenia Laramide dio como resultado estructuras orientadas NW-SE con una vergencia dominantemente hacia el NE. En el área, las rocas de la Formación Mezcalera son fuertemente afectadas por esta orogenia, y debido a que se comportan plásticamente, esta deformación se caracteriza por la abundancia de pliegues muy cerrados, que incluyen formas en "chevron", con ejes axiales orientados de manera general NW-SE e inclinados hacia el NE; esto último sugiere que los esfuerzos compresivos hayan actuado del SW al NE.

La deformación anterior está estrechamente ligada a la historia de la subducción de la placa Farallón bajo Norteamérica, ya que es detrás del arco desarrollado por este evento donde se dio la deformación Laramídica. Particularmente en la región del acuífero, este proceso es el responsable de la historia magmática de la Sierra Madre Occidental (SMO).

Las secuencias ignimbríticas del Supergrupo Volcánico Superior dentro de la SMO están coronadas por rocas volcánicas de composición andesítico-basáltico, a las que se les ha denominado andesitas SCORBA.

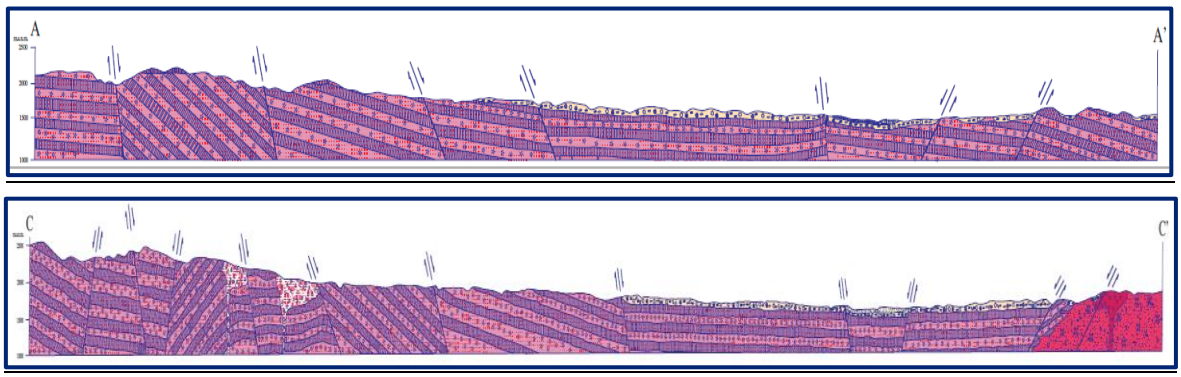
Estas rocas tienen un gran significado tectónico ya que marcan el cambio de un ambiente en subducción a otro de distensión intraplaca (Cameron et al., 1989). Este evento extensional debió haber iniciado a principios del Mioceno y generó una serie de cuencas continentales, cuyo relleno sedimentario, para aquellas desarrolladas en la región, está representado por las secuencias conglomeráticas que incluyen actividad volcánica sincrónica dentro de éstas.

A finales del Mioceno, después de los 12 Ma, de nuevo una actividad tectónica distensiva provoca el basculamiento de las rocas del relleno sedimentario antes mencionado y la reactivación del volcanismo (Ferrari et al., 2005; Henry y Aranda-Gómez, 2000). Finalmente, los procesos de erosión y depósito dentro de cuencas continentales actuales permiten el depósito de sedimentos en ambientes predominantemente continentales.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Florido y arroyos tributarios. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como son las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera G13-C18 "Santa María del Oro" Esc. 1:50.000 (SGM, 1998)
Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento, y a mayor profundidad las lutitas que forman parte de la secuencia que constituye la Formación Mezcalera.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución Laramídica.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle.
La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas y poca presencia de basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

A mayor profundidad las rocas calizas y areniscas representan un acuífero con características confinantes cuyo potencial que aún no ha sido explorado, pero que puede ser escaso debido a que estas rocas sólo se presentan en pequeños afloramientos en la porción suroriental del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en el año 2010, se realizaron dos pruebas de bombeo de corta duración en etapas de abatimiento y de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Theis & Jacob.

El primero se utilizó para los datos tomados en abatimiento y el segundo para los de recuperación. De los resultados de la interpretación por los métodos analíticos, se establece que los valores de transmisividad **1.82 x10^{-2} y 4.36 x10^{-3}m^2/s** con un valor promedio de **8.28 x10^{-3}m^2/s**; los valores de conductividad varían de **1.42 x10^{-4}y 1.76 x10^{-5} m/s** con un valor promedio de **6.46 x10^{-5} m/s** para la etapa de recuperación (tabla 2).

Tabla 2. Parámetros hidráulicos del acuífero

		Abatimiento		*Recuperación*	
Aprovechamiento	**Tipo**	**T(m²/s)**	**K(m/s)**	**T(m²/s)**	**K(m/s)**
CNA-1009-008	Pozo	4.36 X10^{-3}	3.42 X10^{-5}	1.82 X10^{-2}	1.42 X10^{-4}
CNA-1009-009	Pozo			2.28 X10^{-3}	1.76 X10^{-5}

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2010, que se muestra en la figura 4, los valores varían desde algunos metros, a lo largo del cauce del río Sextín y arroyos hasta los **30 m**, aumentando gradualmente hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

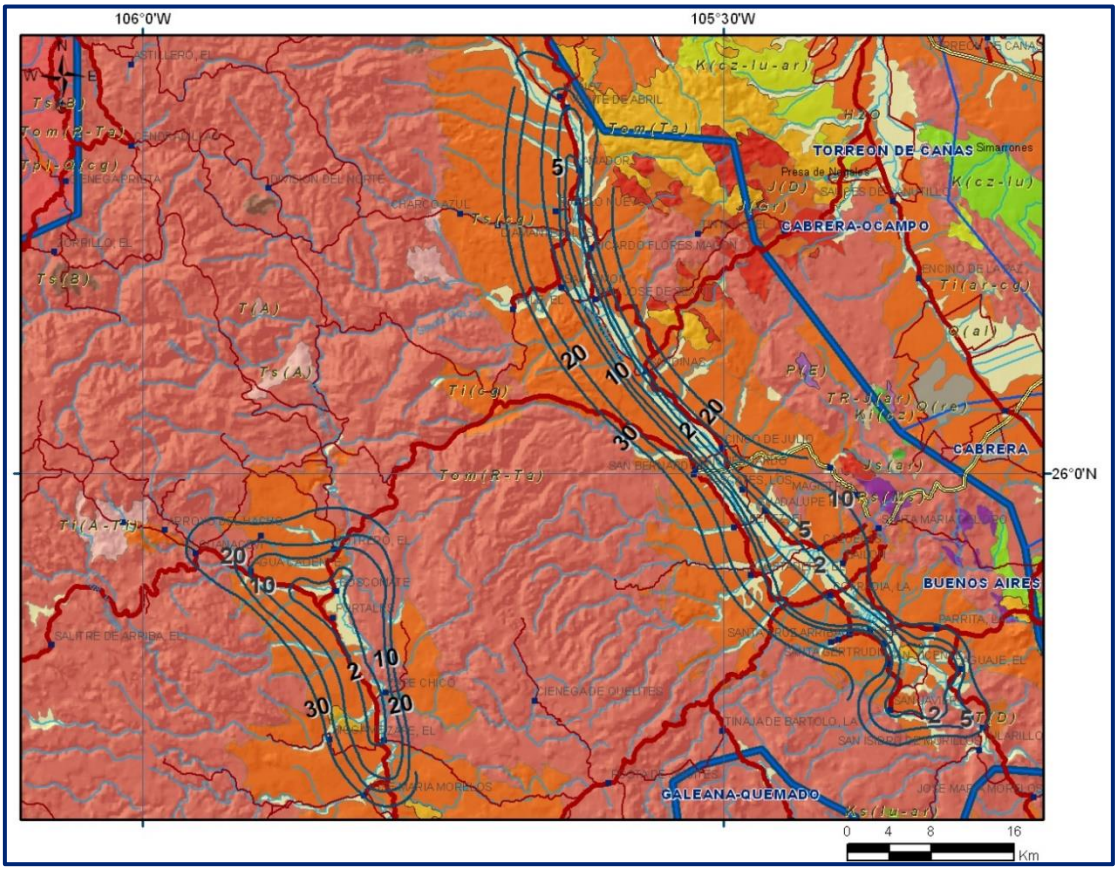


Figura 4 Profundidad al nivel estático en m, (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían entre 1940 a 1550 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

Los valores más bajos se localizan en la porción suroriental del acuífero, a lo largo del cauce del Río Sextín, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia el noroeste.

De esta manera, es posible identificar la dirección preferencial del flujo subterráneo de noroeste a sureste, alimentada por las aportaciones procedentes de los flancos oriental y occidental.

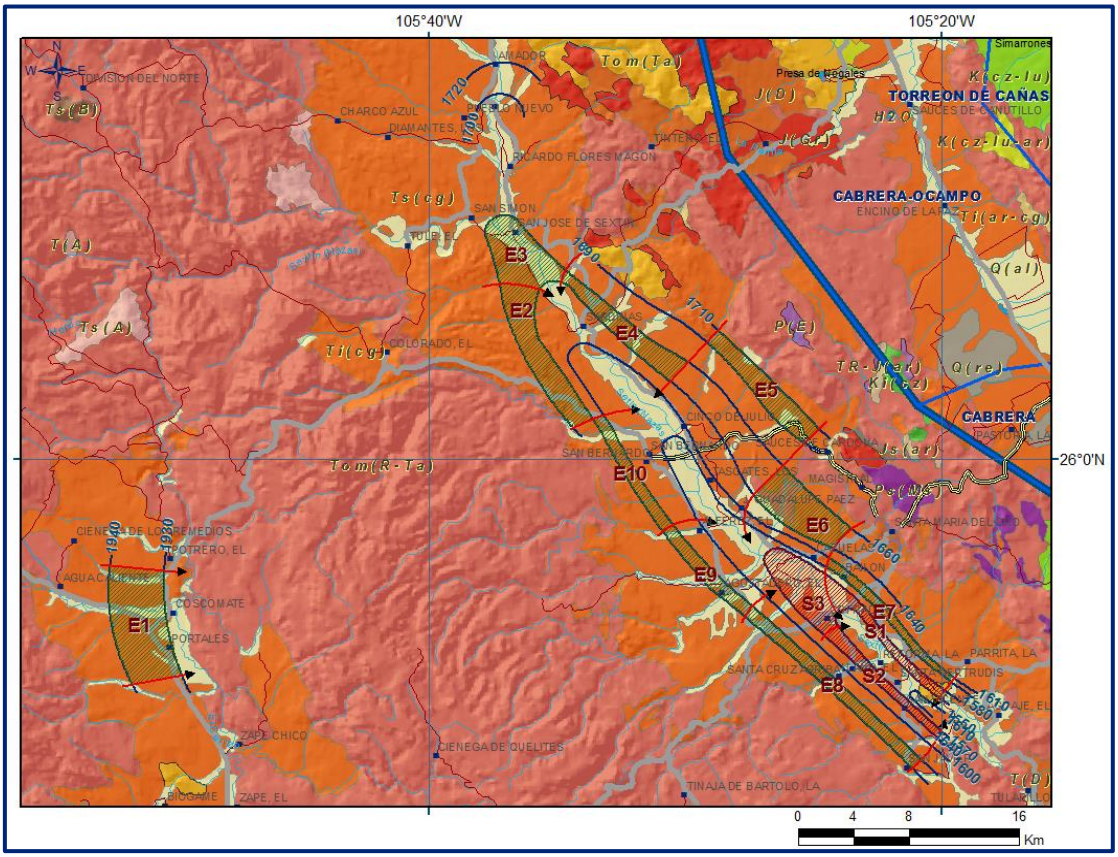


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.1 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

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 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 13muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidosen la zona de explotación (4 norias, 9 pozos), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero (tabla 3).

Tabla 3. Aprovechamientos muestreados en el acuífero.

APROVECHAMIENTOS	X	Y	Lat	Long.	CE (µs/cm)	STD (ppm)	pH	T °C	ALK (ml de HCl)
CNA-1009-001	459238	2876746	26 00' 32.48554"	-105 24' 26.40407"	470	230	7.4	23	4.5
CNA-1009-003	458869	2876224	26 00' 15.42702"	-105 24' 39.59087"	600	300	7.5	21	4.5
CNA-1009-004	462133	2872033	25 57' 59.54658"	-105 22' 41.76564"	1520	750	7.6	23	10.0
CNA-1009-008	463660	2872382	25 58' 11.01726"	-105 21' 46.88867"	1050	510	7.7	18	8.2
CNA-1009-009	458812	2866772	25 55' 08.18038"	-105 24' 40.59808"	470	230	7.6	24	4.8
CNA-1009-013	459041	2864587	25 53' 57.18588"	-105 24' 32.10160"	340	340	7.2	23	3.2
CNA-1009-018	463199	2858032	25 50' 24.50226"	-105 22' 02.03733"	550	270	7.4	20	6.2
CNA-1009-021	458127	2867290	25 55' 24.97528"	-105 25' 05.26422"	310	310	7.4	23	2.9
CNA-1009-060	403919	2868864	25 56' 06.87506"	-105 57' 34.24739"	675	306	7.99	23.63	1.3
CNA-1009-063	412598	2864976	25 54' 02.43072"	-105 52' 21.31385"	708	319	7.68	19.93	4.9
CNA-1009-065	417382	2860213	25 51' 28.64054"	-105 49' 28.31726"	661	297	7.45	18.97	4.7
CNA-1009-CHUPADEROS	456782	2863605	25.89028	-105 43 144	290	290	7.6	22	2.5
CNA-1009-GO1	404626	2869318	25.93938	-105.95248	115	52	8.14	20.17	2.5

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de **52 a 750** ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la Norma Oficial Mexicana 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.

Los aprovechamientos muestran valores promedio de 323 ppm, ubicados uniformemente en el área de explotación del acuífero, mientras que los mayores se registran hacia el este (510 y 750 ppm).

Los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo noroccidental del acuífero, mientras que los mayores se registran en la porción central y suroriental, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída de los aprovechamientos se clasifica en: **C_1S_1**, agua de baja concentración de sodio y de salinidad baja, **C_2S_1**agua de salinidad media y contenido bajo de sodio intercambiable, (**C_3S_1**) agua de salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable, esto indica que las tres clases de agua son apropiadas para su uso en riego sin restricciones.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron tres familias de agua bicarbonatada-cálcica que corresponde a agua de reciente infiltración que ha circulado principalmente a través de rocas volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 70 aprovechamientos en el acuífero, de los cuales 37 son pozos y 24 norias, y 9 de ellos no se tuvo acceso; todos ellos activos.

El volumen de extracción se ha estimado en **3.2 hm^3 anuales,** de los cuales 1.7 hm^3 (53.1 %) se destinan al uso agrícola,1.4 hm^3 se destinan para uso público-urbano (43.8%) y los 0.1hm^3 restantes (3.1%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

7. BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 240 km^2 que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos.

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 como sigue:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita sobre los depósitos aluviales y conglomerados que conforman los valles, así como la infiltración que se produce a lo largo de los escurrimientos superficiales (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔVS) 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:

$$\mathbf{Rv + Eh - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S)} \qquad \mathbf{(1)}$$

Donde:
Rv= Recarga vertical;
Eh= Entradas subterráneas por flujo horizontal;
B= Bombeo;
Sh= Salidas subterráneas por flujo horizontal;
ETR= Evapotranspiración real;
ΔV(S)= Cambio en el volumen almacenado;

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

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh} \qquad \mathbf{(2)}$$

7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, 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:

$$Q = B * i * T$$

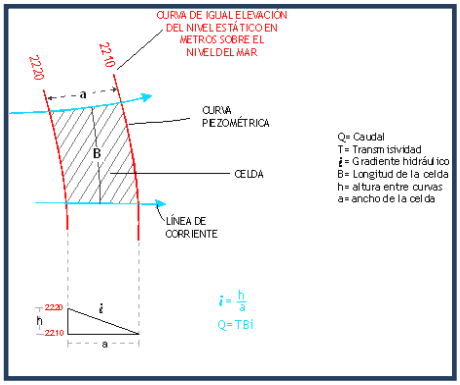
Donde:

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 uno de los canales establecidos.

En la tabla 4 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **30.5 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	8510	3830	10	0.0026	0.0005	0.0111	0.4
E2	10640	1700	20	0.0118	0.0010	0.1252	3.9
E3	4250	2980	20	0.0067	0.0015	0.0428	1.3
E4	10210	2130	20	0.0094	0.0008	0.0767	2.4
E5	11490	1700	20	0.0118	0.0005	0.0676	2.1
E6	7230	1060	20	0.0189	0.0005	0.0682	2.2
E7	11915	1280	10	0.0078	0.0005	0.0465	1.5
E8	15745	1490	30	0.0201	0.0008	0.2536	8.0
E9	7660	1280	30	0.0234	0.0008	0.1436	4.5
E10	9360	1700	30	0.0176	0.0008	0.1321	4.2
						Total entradas	30.5

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, obtenidas tanto en este acuífero como en los acuíferos vecinos, adaptadas al espesor saturado en cada zona y correlacionadas hidrogeológicamente debido a que tanto el origen como la evolución geológica son comunes en esta región del país.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh), a través de evaporación directa en las zonas de niveles freáticos someros (Ev) y por Bombeo (B). No existen manantiales, ni flujo base en ríos, ya que ambos son de régimen intermitente.

7.2.1 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 NE del año 2010, mostrada en la figura 5.

Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación. El valor total estimado de **17.6 hm3 anuales**se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de Salidas subterráneas por flujo horizontal

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	11490	1275	10	0.0078	0.0030	0.2704	8.5
S2	12340	1700	10	0.0059	0.0030	0.2178	6.9
S3	6810	2980	10	0.0034	0.0030	0.0686	2.2
						Total entradas	**17.6**

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real).

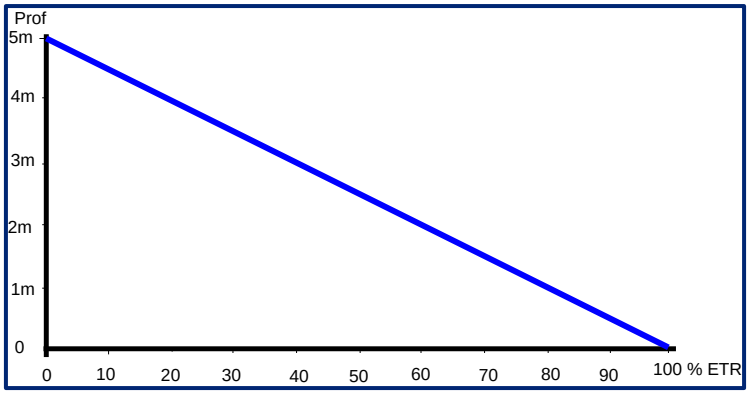
Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	15		
P(mm) =	585.1	P^2 =	342342.01
L =	843.75	L^2 =	711914.063
ETR (mm)	497.9		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc. (ver figura 4).



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el 50 % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Tomando en cuenta una superficie de 60 km^2 en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 2.5 m y la lámina de evapotranspiración obtenida de497.9 mm (con valores de 585.1 mm anuales para la precipitación y 15.0 °C de temperatura).

ETR = 60 km^2 (0.4979 m) (0.5) = 14.9

Por lo tanto; ETR = **14.9 hm^3/año**.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de los **3.2 hm^3 anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(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 cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. 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 y 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, **ΔV(S) = 0**.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la ecuación (2):

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR - \Delta V(S) - Eh}$$

$$Rv = 17.6 + 3.2 + 14.9 - 0.0 - 30.5$$

$$\mathbf{Rv = 5.2\ hm^3\ anuales}$$

De esta manera la recarga total media anual es la suma de todas las entradas:

$$\mathbf{Rt = Rv + Eh}$$

$$Rt = 30.5 + 5.2$$

$$Rt = \mathbf{35.7\ hm^3}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto de manera natural como incidental. Para este caso particular, su valor es de **35.7 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 valor es de **0.0 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **9,555,121 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 35.7 – 0.0 – 9.555121
DMA = 26.144879 hm^3 anuales

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **26,144,879 m^3 anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Cabrera-Ocampo, Matalotes-El Oro, San José de Nazareno, Galena-El Quemado, La Victoria, Buenos Aires, Torreón de Cañas, San Fermín, San Juan del Río, Cabrera, La Zarca-Revolución y Revolución, estado de Durango. Realizado por convenio con la Universidad de Sonora.