CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE CANATLÁN (1002), ESTADO DE DURANGO

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1. Localización 2
1.2. Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1. Provincia fisiográfica 6
3.2. Clima 7
3.3. Hidrografía 8
3.4. Geomorfología 10
4. GEOLOGÍA 12
4.1. Estratigrafía 14
4.2. Geología estructural 24
4.3. Geología del subsuelo 26
5. HIDROGEOLOGÍA 27
5.1. Tipo de acuífero 27
5.2. Parámetros hidráulicos 28
5.3. Piezometría 28
5.4. Comportamiento hidráulico 28
5.4.1.Profundidad al nivel estático 28
5.4.2.Elevación del nivel estático 29
5.4.3.Evolución del nivel estático 30
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 31
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA 32
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 33
7.1. Entradas 33
7.1.1.Recarga vertical (Rv) 34
7.1.2.Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 34
7.1.3Retornos de riego (Rr) 36
7.2. Salidas 36
7.2.1.Bombeo (B) 36
7.2.2.Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 36
7.2.3.Evapotranspiración real (ETR) 37
7.2.4.Descarga por manantiales (Dm) 38
7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S) 38
8. DISPONIBILIDAD 39
8.1. Recarga total media anual (R) 40
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 40
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 40
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 41
9. BIBLIOGRAFÍA 42

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 Valle de Canatlán, definido con la clave 1002 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Durango, entre los paralelos 24° 06' y 24° 42' de latitud norte y 104° 30' y 105° 07' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,545 km^2. Limita al norte con el acuífero Valle de Santiaguillo; al noreste con San Juan del Río, al este y sur con Valle del Guadiana y al oeste con Tepehuanes-Santiago, todos ellos pertenecientes al estado de Durango (figura 1).

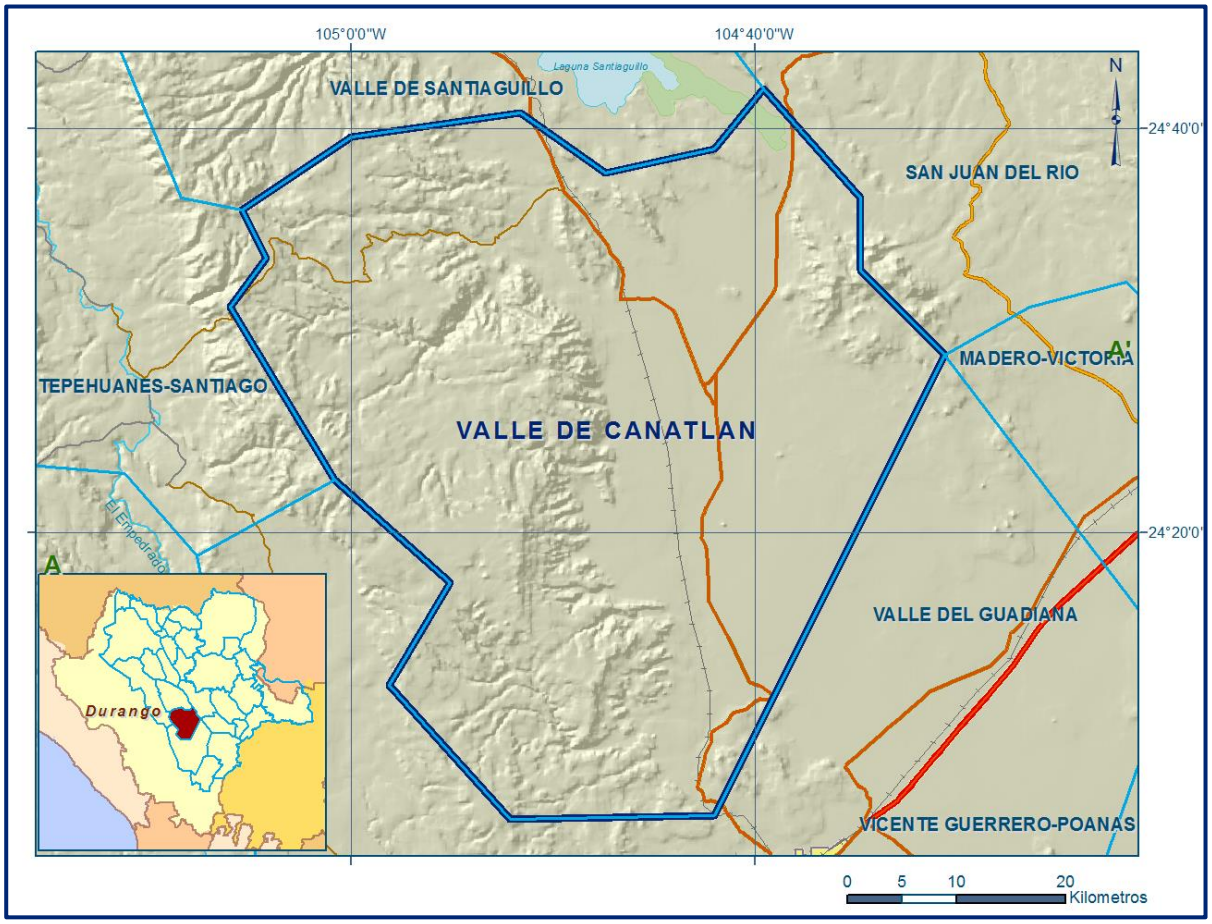


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero comprende la mayor parte de municipio de Canatlán y porciones menores de Durango, Nuevo Ideal, San Juan del Río y Pánuco de Coronado.

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 1002 VALLE DE CANATLAN						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	104	42	0.0	24	6	0.0
2	104	52	8.2	24	5	48.8
3	104	58	7.4	24	12	28.4
4	104	55	5.0	24	17	31.7
5	105	0	48.8	24	22	38.1
6	105	6	0.0	24	31	12.0
7	105	4	12.0	24	33	36.0
8	105	5	24.0	24	36	0.0
9	105	0	0.0	24	39	36.0
10	104	51	36.0	24	40	48.0
11	104	47	24.0	24	37	48.0
12	104	42	0.0	24	39	0.0
13	104	39	36.0	24	42	0.0
14	104	34	48.0	24	36	36.0
15	104	34	48.0	24	33	0.0
16	104	30	36.0	24	28	48.0
1	104	42	0.0	24	6	0.0

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Valle de Canatlán pertenece al Organismo de Cuenca III "Pacífico Norte", al Consejo de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, instalado el 15 de junio de 2000, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Durango. Los resultados de los estudios de disponibilidad elaborados por la CONAGUA fueron dados a conocer mediante el *"ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero Valle de Canatlán, clave 1002, en el Estado de Durango", a través del Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero Valle de Canatlán, A.C., órgano auxiliar del Consejo de Cuenca Río Presidio al San Pedro el 28 de agosto de 2008, en el Municipio de Canatlán y publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23 de agosto de 2010, así como en el periódico "El Siglo de Durango", periódico de mayor circulación en la región, el 5 de septiembre del mismo año".*

En la superficie completa del acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del "*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en los tres acuíferos que se indican"*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, se prohíbe la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

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 1.

El uso principal es el agrícola. En el territorio del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 052 "Estado de Durango".

Los usuarios se encuentran organizados a través del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Valle de Canatlán, A.C., instalado el 29 de abril de 2003.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, otros con fines de prospección minera y algunos de cobertura regional en acuíferos vecinos. Entre los más importantes que cubrieron la superficie completa del acuífero se mencionan los siguientes:

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS MADERO-VICTORIA Y VICENTE GUERRERO-POANAS, EN EL ESTADO DE DURANGO, elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V., 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; El más reciente que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación, en ambos se realiza una recopilación de los estudios previos más relevantes.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL REGLAMENTO ESPECÍFICO DE LOS ACUÍFEROS VALLE DE SANTIAGUILLO, VALLE DE CANATLÁN, VALLE DEL GUADIANA, MADERO-VICTORIA Y VICENTE GUERRERO-POANAS, EN EL ESTADO DE DURANGO, elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2014. El estudio tuvo como objetivos actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, plantear el balance de aguas subterráneas, realizar/actualizar el modelo de simulación hidrodinámica de los acuíferos para definir acciones tendientes a la estabilización del acuífero, 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.

De sus resultados se podrán determinar las causales de interés y de utilidad pública señaladas en el la Ley de Aguas Nacionales, para establecer la medida regulatoria que proceda. 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 Valle de Canatlán se localiza en la provincia fisiográfica “Sierra Madre Occidental”, que se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, la porción oriental en la Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango y la porción occidental en la Subprovincia Gran Meseta y Cañadas Duranguenses.

La Sierra Madre Occidental es una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. En sus 1500 km de longitud recorre Arizona, parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal de México. Cubre 289,000 km² y ocupa la sexta parte del territorio mexicano. Su punto más alto es el Cerro Gordo ubicado en Durango, su ancho promedio es de 150 km, con alturas de hasta 3,000 msnm.

Presenta una orientación NW-SE y comprende la porción occidental del Estado de Durango; es una extensa meseta formada por rocas volcánicas disectada por fallas normales y grabens, cuyo borde occidental se caracteriza por presentar una terminación abrupta con fallas normales que presentan grandes desplazamientos y zonas de barrancas profundas.

La subprovincia de Sierras y Llanuras de Durango es una franja angosta y alargada que forma parte de los costados orientales de la Sierra Madre Occidental, desde Cuauhtémoc en Chihuahua hasta Sombrerete en Zacatecas. Está representada por llanuras amplias y una manifestación importante de mesetas, constituidas principalmente por riolitas e ignimbritas.

La Gran Meseta y Cañones Duranguenses está formada por rocas de tipo ígnea extrusiva ácida y formada principalmente por mesetas de gran superficie con cañadas y de sierra alta con cañones. En el acuífero presenta las principales elevaciones topográficas cuya elevación varía de 2,500 a 2,900 msnm; su principal rasgo son las grandes mesetas limitadas por abruptos y enormes acantilados.

Las características especiales de estas subprovincias son su elevación sobre el nivel medio del mar y el gran número y extensión de sus hermosos y fértiles valles, separados uno de otros por altas barreras montañosas.

3.2. Clima

De acuerdo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el territorio que cubre el acuífero predominan climas de tipo templado y seco, que se presentan en forma de franjas orientadas en sentido suroeste-noreste. El clima dominante en la mayor parte de la superficie es de tipo BS1kw, que es un clima semiárido templado con verano cálido; en las zonas influenciadas por este clima los meses de lluvia máxima son junio y septiembre con 70 y 80 mm. Presenta con régimen de lluvias en verano, de acuerdo con la condición de temperatura (k) es templado con verano cálido y se caracteriza por presentar una temperatura media anual entre 12 y 18 °C.

En la porción occidental predomina el clima templado, en diferentes variantes que de oeste a este son: clima semifrío de tipo subhúmedo CE (w2), con régimen de lluvias es de verano, y la temperatura media anual se encuentra entre 5 y 12 °C. Clima C (w1), templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano y escasa precipitación el resto del año o de invierno.

La temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18 °C. Su cociente precipitación/temperatura se encuentra entre 43.2 y 55.0. Por último, el clima de tipo C (w0), que presenta las mismas características que el C(w1) variando únicamente en el grado de humedad, que en este caso es el más seco de los subhúmedos, de modo que el cociente precipitación/temperatura es menor de 43.2.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Canatlán (SMN), El Pino, San Bartolo y Canatlán (DGE), con diferentes periodos de registro, que comprenden de 1942 a 2013, según la variable medida. Con estos datos y utilizando el método de isoyetas e isotermas, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **471.8 mm** y **16.2°C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,685 mm anuales.**

3.3. Hidrografía

El acuífero Valle de Canatlán se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 11 Presidio-San Pedro, en su vertiente del Pacífico, Subregión Hidrológica San Pedro, Rosa Morada y Acaponeta, cuenca Río San Pedro, que comprende los estados de Durango, Nayarit y Zacatecas, subcuenca Río La Sauceda.

En el territorio que cubre el acuífero se localiza una gran cantidad de corrientes superficiales la mayoría de ellas de régimen intermitente, sin embargo, existen corrientes perennes, como las localizadas en la porción norte, centro y sureste del acuífero.

En el norte se encuentran los ríos perennes: Las Hornillas, Las Tablas y El Peñón que después cambia su nombre a La Tinaja y termina como Río El Yerbaniz. Al sur la corriente perenne es el Río La Sauceda.

Las principales corrientes superficiales de la región son el Arroyo El Mimbre que nace en las sierras ubicadas al noroeste de Canatlán y desemboca en la represa San Bartolo, ubicada al este de la misma localidad, y el Río Canatlán que nace en las inmediaciones de la Sierra La Sauceda, el cual se une al Río La Sauceda que desciende del noroeste de Canatlán.

El Río La Sauceda nace de la unión del Arroyo La Sauceda, Los Bueyes y El Saucillo, provenientes del norte del acuífero, al suroeste de la localidad El Sauz Bendito y al noroeste de la localidad Cerro Gordo.

Su dirección es de norte a sur hasta desembocar en la Presa Peña del Águila. Rodea la Sierra de Epazote y pasa por la población de Canatlán; después cambia su rumbo al sureste hasta la presa Peña del Águila, recibiendo en su recorrido algunas aportaciones de arroyos torrenciales que descienden de las sierras Cacaria y San Rafael.

El principal afluente del Río La Sauceda es el arroyo del Carpintero. Después del embalse de la presa Peña del Águila, el Río Sauceda abandona la cuenca de Canatlán y une sus aguas al Río Tunal, que junto con otras corrientes forman el Río Mezquital que desemboca al Océano Pacífico, con el nombre de Río San Pedro, en el Estado de Nayarit.

En el acuífero Valle de Canatlán existen 2 lagunas y un lago. El Lago Las Cóconas se ubica en el límite noroccidental, a una altitud aproximada de 2,500 msnm. La Laguna Seca se localiza en la porción oriental, al sur de las localidades Álvarez (El Gallinazo) y Los Arcos, tiene como afluente a un arroyo intermitente. Por su parte, La Laguna La Gringa es un cuerpo de agua intermitente que se ubica al sur de la Laguna Seca, al este de la localidad Cerro Gordo y del Río La Sauceda.

Existen además 16 presas, 12 localizadas en la porción norte, 2 (Derivadora Nogales y Tanque Rucio) en la región central, una (Castillo Largo) en el extremo este y otra (Peña del Águila) en la porción suroriental.

Las cuatro presas más importantes de acuerdo a su capacidad de almacenamiento son las presas Caboraca, San Bartolo, Peña de Águila y El Baluarte.

La presa Caboraca se localiza al este de la localidad El Cura y al norte del poblado El Presidio y de la Ciudad Canatlán, la principal corriente que le aporta agua es el Arroyo La Sauceda. Su capacidad de almacenamiento es de 45 hm^3 y se utiliza para el riego agrícola.

La presa San Bartolo se localiza en la porción noreste del acuífero, al este de la presa Caboraca y al oeste de la localidad Medina, su principal afluente es el Arroyo Los Mimbres, que proviene de la región noroeste del acuífero. Su capacidad de almacenamiento es de 43.4 hm^3 y se utiliza para riego y abrevadero. La presa Peña del Águila se ubica al sureste del acuífero, entre las localidades Juan B. Ceballos y San Francisco, su principal afluente es el Río La Sauceda.

Su capacidad de almacenamiento es de 30 hm^3. La presa El Baluarte se localiza en el extremo norte del acuífero, al sur de la presa José María Patoni o El Yerbaniz, su principal afluente el río perenne La Tablas y el Arroyo Cuesta Colorada; su capacidad de almacenamiento es de 30 hm^3. Estas dos última se utilizan para el riego agrícola.

El volumen que pueden almacenar las presas restantes no sobrepasa 1 hm^3 cada una, entre ellas se puede mencionar las siguientes: San Bernardino, Los Lirios, El Progreso, Castillo Largo, El Casco, Margos y Manuel R. Núñez, entre otras.

3.4. Geomorfología

La Sierra Madre Occidental en Durango, por su ubicación dentro del contexto continental, se manifiesta majestuosamente a lo ancho de más de 140 km, con rumbo noroeste-sureste, al oeste de la ciudad de Durango donde alcanza su altura media de 2,650 msnm, sus elevaciones máximas son del orden de los 3,000 msnm y pueden ser observadas desde el Océano Pacífico.

El relieve de esta provincia se caracteriza por presentar cañones profundos y topografía abrupta, donde es factible encontrar pequeños y estrechos valles en los cañones; la topografía tiende a ser más suave hacia el oriente y al sur, en donde se encuentran amplios valles y extensas llanuras. Las máximas elevaciones en la región están representadas por el cerro Blanco (2,300 msnm) y una porción de la Sierra Gamón (2,580 msnm). La zona de menor elevación se representa en el río Peñón Blanco, con una altitud de 1,450 msnm. Los elementos fisiográficos que caracterizan el relieve de la región que ocupa el acuífero son: valles, mesetas, lomeríos y sierras.

Los valles se localizan en toda la porción central del acuífero; representado por el Valle de Canatlán, orientado en dirección general N-S a lo largo de 55 km, en la que está alojada la Laguna Canatlán y numerosos lagos alimentados por los escurrimientos procedentes de las sierras; tiene una altitud promedio de 1930 msnm y muestra una inclinación sensible hacia el N. Está limitado en todo su contorno por rocas volcánicas de composición ácida.

Al norte por la Sierra del Pozole, al sur por el Cerro del Mercado, al oeste por la Sierra del Epazote, la Mesa de Juárez y la Mesa del Divisadero; y al este por la Sierra La Silla, que colinda al extenso campo de lavas basálticas conocido con el nombre de “Malpaís” y la “Breña”, en la que se elevan pequeños conos volcánicos, algunos aislados y otros en grupo o cadenas.

A lo largo de él escurren numerosos arroyos que alimentan la laguna y que se originan en las partes topográficamente más altas de las sierras.

El conjunto de drenajes tiene un patrón dendrítico, posiblemente desarrollado siguiendo líneas de debilidad, como fracturas y fallas.

La red de drenaje se orienta hacia las partes bajas del valle, donde labra su cauce el Río La Sauceda, el cual tiene un desarrollo de forma errática con poca profundidad y algunos meandros, que descarga en el vaso de la presa Peña del Águila

Los lomeríos están ubicados en una pequeña zona ubicada en la porción oriental y conformados, al igual que las mesetas, por robas basálticas.

Las sierras limitan al valle en toda su extensión y están orientadas en sentido NW-SE, constituidas, por tobas en su parte inferior y por ignimbritas en la porción superior. Tienen una altitud que varía de 2300 a 2,900 msnm y un desnivel promedio de 800 m con respecto al valle.

La diferencia de pendiente y del patrón de drenaje que existe en la parte inferior de las sierras con respecto a la parte superior, se deben a la litología: las tobas presentan un grado menor de consolidación en comparación con las rocas que le subyacen.

Esto las hace menos resistentes al paso del agua, por lo que no existe desarrollo de corrientes superficiales. Por el contrario, las rocas de la porción superior ofrecen mayor resistencia al paso del agua debido a su grado de consolidación, por lo que son más susceptibles al desarrollo de drenaje sobre su superficie. En la cima de las sierras se observan grandes escarpes originados por erosión y otros de origen tectónico.

El Valle de Canatlán presenta extensas llanuras más o menos planas, su origen es de relleno de aluvión, con una altura de aproximadamente 1,915 msnm, en el que se encuentran ubicados lagos que son alimentados por algunos escurrimientos originados por las lluvias en las partes altas de las sierras.

También hacia las planicies existen algunos cerros y mesetas de poca altura que por lo general son de constitución basáltica.

4. GEOLOGÍA

La región se encuentra en el límite de los terrenos Parral, Guerrero y Sierra Madre. En la Región de Bacís, en el Río Los Remedios y el Arroyo Las Truchas fue reconocida una secuencia vulcanosedimentaria compuesta por pizarras, filitas con intercalaciones de meta-andesitas, capas ocasionales de meta-areniscas y meta-conglomerados con fragmentos de pizarras y filitas. Por su similitud litológica se correlaciona con la Formación San José de Gracia del norte de Sinaloa, que se sitúa en el Paleozoico Superior. Esta unidad podría pertenecer al Terreno Guerrero (Figura 2).

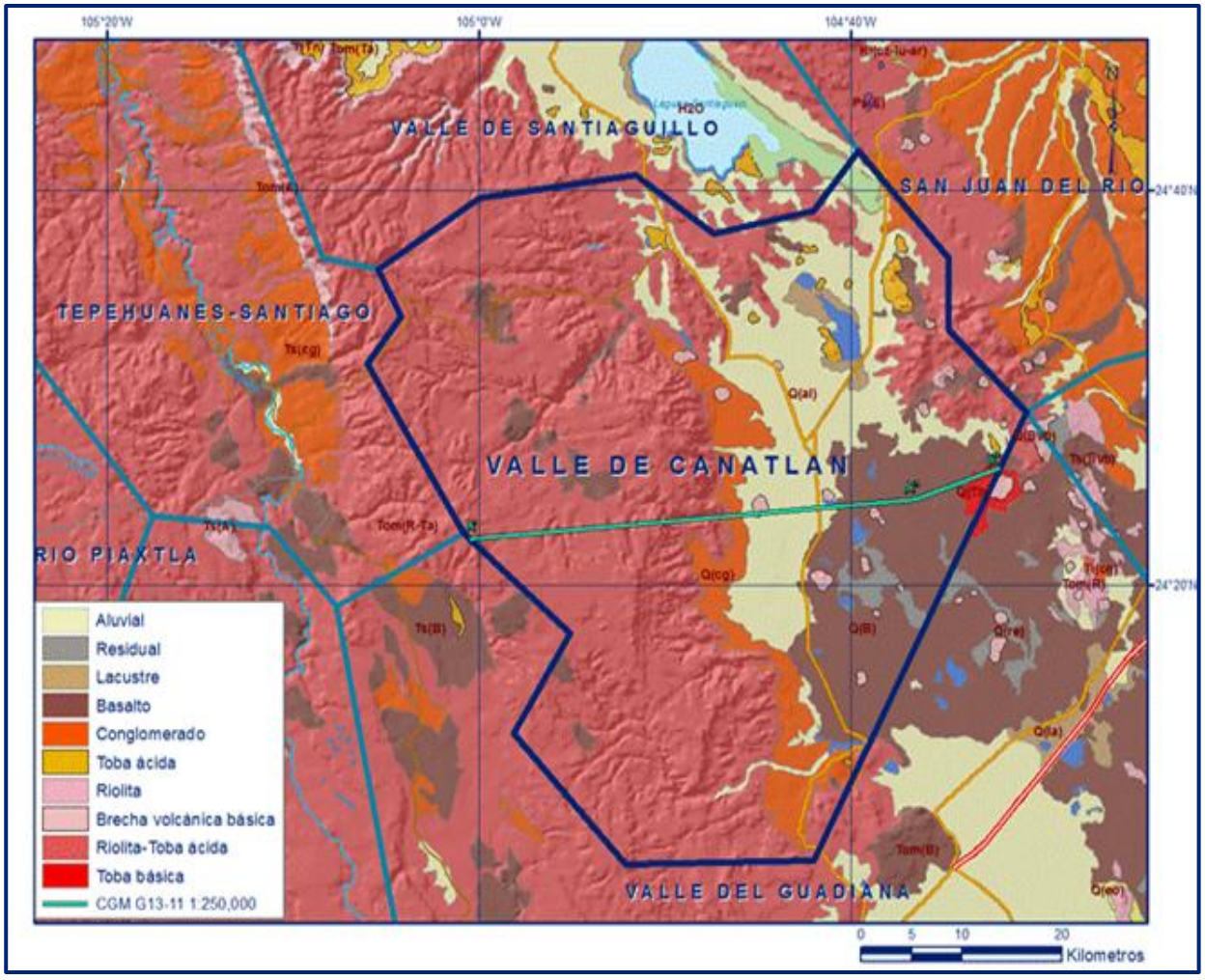


Figura 2. Geología general del acuífero

El basamento del Terreno Parral está compuesto por micaesquistos que afloran en el Arroyo Medrano en la población Diez de Octubre y milonitas reconocidas en el arroyo Los Pastores en San Lucas de Ocampo; que han sido datadas con una edad correspondientes al Pérmico Medio (Carta Geológico-Minera “Durango” G13-11 Escala 1:250,000. SGM, 1998).

Sobreyaciendo discordantemente a este basamento se encuentra una secuencia rítmica de areniscas y lutitas que hacia la cima cambian a capas de caliza en estratos delgados a medianos con intercalaciones de limolitas de color rosa y escasas bandas de pedernal; se correlacionan con las formaciones Mezcalera y Baluarte. Por el contenido faunístico de amonitas alcanza una edad del Tithoniano-Neocomiano y posiblemente hasta el Albiano.

En la porción noroeste de la Sierra de Yerbaniz aflora la Formación Cuesta del Cura (?), constituida por una secuencia de calizas arcillosas dispuestas en capas delgadas a medianas con bandas y nódulos de pedernal muy deformadas, con microfauna de edad Albiano-Cenomaniano. Esta unidad pertenece al Terreno Sierra Madre y está cabalgada por la Formación Mezcalera.

Discordantemente sobre el paquete anterior se depositó un conglomerado de fragmentos de riolita y andesita, conocido localmente como Formación Las Palmas, mientras que en la porción oriental el Conglomerado Ahuichila descansa sobre las secuencias mesozoicas; está constituido por fragmentos de caliza, areniscas, lutitas y algunos clastos de granito, en una matriz arcillosa y cementante calcáreo.

La edad asignada a ambas unidades es del Eoceno y quizás alcance el Oligoceno Temprano, cubriendo al Conglomerado Las Palmas se tiene un paquete vulcanoclástico que consiste de brechas, tobas, areniscas y limolitas de color rojizo.

En la porción oriental también se deposita una secuencia similar consistente de areniscas con intercalaciones de tobas híbridas, cubierta por una capa de conglomerado con calcedonia de la Formación San Pablo, cuya edad inferida corresponde al Oligoceno. Intrusionando a las rocas antes descritas en Tayoltita y Bacís se observa un cuerpo granítico con variaciones a granodiorita y monzonita que forma parte del Batolito de Sinaloa.

El área que comprende el acuífero se encuentra dominada por rocas de origen volcánico, en tanto que los materiales sedimentarios están representados por la secuencia fluvial de la Formación Guadiana, así como por los sedimentos de abanicos aluviales del Cenozoico Superior.

Las rocas de la Secuencia Volcánica Inferior en la vecindad del Valle de Guadiana se encuentran sobreyacidas por un paquete de aproximadamente 800 m de espesor de rocas de composición riolítica, principalmente por flujos de ceniza, llamada informalmente Secuencia Volcánica Durango (Swanson et. al., 1978).

Esta secuencia está sobreyacida discordantemente por basaltos del Mioceno al norte de Durango y por basaltos cuaternarios y gravas en el Valle del Guadiana.

Christiansen y Swanson (op. cit.), establecen que, de acuerdo con la práctica común, dentro de los terrenos volcánicos silíceos la extensión de los cuerpos tabulares de flujos de ceniza ocurre de un estado formacional.

Bajo este contexto, estos autores establecen que varias de las formaciones conocidas en los alrededores de la ciudad de Durango están implícitamente relacionadas con el complejo volcánico de la Caldera de Chupaderos.

Estas formaciones volcánicas están incluidas dentro del Grupo Carpintero que de la más antigua a la más joven son las siguientes unidades: Águila, Cacaria y Santuario.

Estas formaciones se encuentran a su vez sobreyacidas por las formaciones Tunal, Santa María y Garavito, agrupadas para fines prácticos de cartografía dentro de la secuencia Río Chico Inferior; de igual forma las unidades Tapias, Saltito, Mimbres y Soldado se considera dentro de la secuencia Río Chico Superior. Derrames de basalto cenozoicoss (Mioceno) y cuaternarios cubren discordantemente a la secuencia volcánica riolítica, así como por depósitos aluviales y lacustres del Reciente.

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Cretácico Superior al Reciente (figura 2). Las sucesiones de eventos magmáticos ocurridos se encuentran cubriendo, mediante una discordancia petrológica, a escasos afloramientos de rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior.

El magmatismo inicia en el Oligoceno y continúa de manera interrumpida hasta el Holoceno. A continuación, se describen de la más antigua a la más reciente:

CRETACICO 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; 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, constituida por calizas, dolomías, pedernal y horizontes arcillosos. No aflora en la superficie del acuífero.

CENOZOICO

PALEÓGENO (EOCENO)

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. Sobreyace discordantemente a las rocas mesozoicas y corresponde a un conglomerado de origen continental, tipo "molasse", constituido por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos angulosos a subredondeados de caliza, calcarenita, calcilutita y de rocas volcánicas, con matriz calcárea y limolítica, que se presentan en bancos gruesos y masivos, de colores que varían de gris a rojizo, que conforman lomeríos de pendientes ligeras.

Debido a su posición estratigráfica y su origen, se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia Laramide. Por correlación con depósitos clásticos del centro de México, Fries et al., 1955; Edwards, 1955, le asignan una edad que corresponde al Eoceno-Oligoceno.

Secuencia Volcánica Inferior

Andesitas

Se compone de una secuencia de lavas andesíticas y tobas estratificadas que, de acuerdo con Swanson (op, cit.), se encuentra dispuesta a lo largo de la base de la Sierra El Registro. 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.

Es considerada 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 del 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 1,400 m en una alternancia de andesitas y tobas en la Sierra de Registro y Sierra Colorada, ubicadas al suroeste de la Ciudad 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 de seudoestratos de 0.5 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 Tejámen, 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). Otra datación en la carretera Durango-Mazatlán 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.

En el área del acuífero consiste de corrientes de lavas andesíticas, de tonalidades café a rojizo claro en superficies frescas, variando a café oscuro o verde olivo al intemperismo; muestra una textura porfídica de grano fino en la que se identifican fenocristales de andesina y oligoclasa incluidos en una matriz afanítica, densa y compacta, irregularmente caolinizada, cloritizada y silicificada por procesos deuréticos, neumatolíticos e hidrotermales respectivamente. Comúnmente al exponerse superficialmente se manifiesta deleznable por efectos de intemperismo.

Descansando sobre estas lavas, pero considerándolas de la misma unidad de rocas, se observa la presencia de algunos horizontes y lentes de tobas y aglomerados de afinidad andesítica, acomodados en capas gruesas semiconsolidadas de tonalidades verde y café claro predominantes, constituidos por fragmentos ovoides de andesita, escasos en las tobas, pero abundantes en los aglomerados y clásticos aislados de cuarzo lechoso.

Estos fragmentos se encuentran incrustados en una matriz limo-arenosa de un grado medio de consolidación. Sus afloramientos son escasos y se presentan en forma de horizontes recostados al pie de las sierras.

PALEÓGENO (OLIGOCENO)

Supergrupo Volcánico Superior

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), 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.

Dentro de esta gran unidad litológica se consideran la Toba Registro, el Grupo Carpintero y las secuencias Río Chico Inferior y Río Chico Superior, que se relacionan con la actividad volcánica de la Caldera Chupaderos.

En todas ellas predominan las ignimbritas que son las rocas más ampliamente expuestas, que constituyen las sierras que delimitan el acuífero, como es el caso de la Sierra Candelaria. Cubren discordantemente a las rocas andesíticas de Secuencia Volcánica Inferior; de manera general están constituidas por capas de ignimbritas dispuestas de manera casi horizontal, de tonalidades amarillentas, con abundantes incrustaciones de fragmentos de andesitas y menor proporción de riolitas hacia la base, incluidos en una matriz limo-arenosa, con esquirlas de pómez y cristales de cuarzo, sanidino y hornblenda.

Toba Registro

Las rocas de esta formación consisten de flujos de ceniza soldada o ignimbritas, de coloración rosa grisácea, rojo y morado, con una estructura extremadamente eutaxítica y textura que varía de vítrea a vitrocristalina; contienen 10 a 30 % de fenocristales de sanidino y cuarzo con proporciones menores de plagioclasas y minerales oscuros.

Presentan como característica principal la presencia de cavidades por colapso y por desvitrificación de pómez, con longitudes de 30 a 100 m, cuyas formas varían verticalmente. Afloran en la Sierra El Registro, ubicada al SE de la ciudad de Durango, donde según Keizer (1977) se presenta la secuencia más completa, así como al sur de la misma ciudad.

En la base de la Sierra El Registro, Keizer (1977) y Swanson (1974), le atribuyen un espesor de 300 m, que se encuentran sobreyaciendo discordantemente a la secuencia andesítica basal.

Grupo Carpintero

Toma su nombre del Arroyo Carpintero, en donde se encuentra expuesta una sección completa de las formaciones que la integran. La unidad basal se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Toba Registro. Está constituido por las formaciones Águila, Cacaria y Santuario, las cuales Lyons (1975) considera que se encuentran estrechamente vinculadas con el origen de la Caldera Chupaderos.

Formación Águila

Representa la primera de las grandes unidades eruptivas de la Caldera Chupaderos; toma su nombre informal de la presa Peña Águila construida sobre la unidad en la porción nor-central de la caldera.

Puede ser dividida en una facies intracaldera, la cual rellenó conforme ésta subsidia, y una facies de flujo externo, ampliamente expandida a través del exterior de la caldera (extremos NW del área y al sur de la ciudad de Durango).

La facies externa consiste de flujos de ceniza soldada, de textura vitrocristalina con un contenido mayor de fenocristales de sanidino, cuarzo, plagioclasas y piroxeno con trazas de óxidos de fierro y titanio; esta facies manifiesta de forma común pequeños fragmentos de pómez blanca hacia los bordes de la caldera y fragmentos líticos de manera abundante hacia la zona del complejo de la caldera.

Las facies de conductos de la caldera consisten de brechas volcánicas de estructura masiva, pobremente soldadas, que contienen fragmentos autóctonos hasta de 1 m de diámetro, así como fragmentos menores de rocas graníticas y volcánicas.

Finalmente, las facies del núcleo se componen de tobas de fragmentos líticos del mismo material de la caldera, así como de andesitas y en menor proporción de granitos y rocas sedimentarias, se caracterizan por presentar una apariencia estratificada.

Los espesores de las rocas de esta formación varían de 50 m en los afloramientos ubicados al sur del límite meridional del área, a 100 m o más cerca de los bordes de la caldera, y 250 m en el interior de la misma.

Formación Cacaria

Toma su nombre de la Sierra La Cacaria, localizada al norte de la ciudad de Durango. Es una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que rellenaron la fosa de la caldera, alcanzando un espesor mayor de 300 m, que se adelgaza hacia la porción central de la caldera.

Esta unidad es de interés económico ya que se manifiesta dentro de sus rocas depósitos de casiterita y de óxidos de fierro, conformando estos últimos el impresionante yacimiento Cerro del Mercado.

Formación Santuario

Esta formación fue el resultado de la segunda erupción de la Caldera Chupaderos; toma su nombre del Cerro Santuario, ubicado al sur del Cerro del Mercado (extremo NW del área).

Consiste de flujos de ceniza soldada (ignimbritas), de color gris claro, con una estructura masiva y textura vitrocristalina; contiene fragmentos de pómez que tienden a ser más abundantes hacia el interior de la caldera. Al microscopio se observa que está compuesta de fenocristales de sanidino, plagioclasa, cuarzo y hornblenda. Su espesor varía de 200 m en el interior de la caldera a 100 m en sus bordes.

Secuencia Río Chico Inferior

Se compone estratigráficamente por las formaciones Tunal, Santa María y Garavito, que se caracterizan por estar constituidas por flujos de ceniza soldada que conforman conjuntamente una unidad masiva.

Aflora en la porción suroccidental y occidental de la región, así como en las sierras El Registro y La Pila, ubicadas al sureste y noreste, respectivamente. La litología que caracteriza a esta secuencia consiste de ignimbritas, de color naranja grisáceo y gris púrpura; hacia la base de la secuencia los materiales vulcanoclásticos están menos soldados y presentan fragmentos de pómez extremadamente aplanados, en tanto que hacia la cima se manifiestan en forma abundante cavidades de gas y fragmentos de pómez.

La textura de las rocas varía de vítrea a vitrocristalina, con fenocristales de sanidino, plagioclasas, cuarzo y piroxenos. Su espesor varía de 180 m en el sector noroccidental del área, a 270 m en la porción meridional.

Secuencia Río Chico Superior

Está constituida por las formaciones Tapias, Saltito, Mimbres y Soldado. Dentro del área se encuentra expuesta en las porciones suroccidental y suroriental, respectivamente. Hacia su parte basal las rocas corresponden a flujos de ceniza pobremente compactadas e intercaladas con tobas formadas por cenizas de caída libre y lahares; hacia su porción media la litología se compone de flujos de ceniza soldada de color naranja rojizo, con una estructura eutaxítica y textura vitrocristalina, con abundantes cavidades de gas y pómez. Al microscopio se observan fenocristales de sanidino, cuarzo, plagioclasas y trazas de piroxeno.

La cima de la secuencia manifiesta intervalos de flujos de ceniza medianamente soldados, de textura vítrea a vitrocristalina con abundante pómez y fenocristales de sanidino.

Son de color gris claro y mineralógicamente está compuesta por sanidino, cuarzo, plagioclasas y trazas de piroxeno. El espesor estimado de toda la secuencia es de 250 m.

Basalto Caleras

Estas rocas corresponden a un flujo de basaltos andesíticos que conforma el área ocupada por la Mesa Calera, localizada al norte de la ciudad de Durango. Están compuestos por fenocristales de plagioclasas, diopsida y minerales ferromagnesianos como magnetita e ilmenita, e idingsita. Sobreyace discordantemente a la secuencia Río Chico Inferior y es cubierto de la misma forma por el aluvión cuaternario.

NEÓGENO (MIOCENO)

Conglomerado Polimíctico

Secuencia conglomerática que rellena las depresiones de los valles y que presenta intercalaciones de basaltos. El conglomerado está constituido por clastos de roca mal clasificados de variada composición y tamaño (1 a 20 cm). La composición de los clastos está en función del paquete rocoso que lo delimita, se aprecia cierta gradación y alternancia en la secuencia de depósito que grada de finos a gruesos, aunque en la mayoría de los casos se manifiesta un depósito caótico.

Está compuesto por fragmentos líticos mal clasificados, de color gris claro-amarillento a rojizo, angulosos y subangulosos de tamaño variable, cementados por una matriz areno-arcillosa, areno-tobácea y carbonatada de pigmentación rojiza. La secuencia de conglomerados presenta intercalaciones de basalto, que varían en espesor de 10 a 30 m y una longitud aflorante que varía de algunos cientos de metros hasta más de 1 km. Considerando su posible correlación con la Formación Báucarit, su origen se puede considerar que la secuencia pertenece a una facies clástica que comprende conglomerados polimícticos y areniscas, asociados a la formación de un abanico aluvial. Por otro lado, su origen también se asocia al proceso distensivo que dio origen a las depresiones y por consiguiente a los clásticos que las rellenan.

Formación Metates

Su nombre fue propuesto por Córdoba (1963) para referirse a los derrames de basalto con olivino que sobreyacen en discordancia erosional con la Formación Río Chico. El autor sitúa la localidad tipo en el km 990 de la carretera Durango-Mazatlán, en las cercanías del poblado Metates y le atribuye una edad correspondiente al Paleógeno Superior. Se encuentra en discordancia con las rocas riolíticas, en forma de pequeños afloramientos de basalto de escasa potencia que presentan una coloración gris oscura, intemperizando a color gris rojizo. Aflora al noreste del acuífero. En los trabajos consultados, algunos autores mencionan que estos basaltos son correlacionables con los de la Formación Guadiana.

NEÓGENO (PLIOCENO)

Formación Los Llanos

Designada formalmente por Enciso de la Vega (UNAM, 1968) para referirse a los clásticos continentales probablemente de edad Plioceno o Pleistoceno, que están presentes en el área de la hoja Cuencamé y que se encuentran ampliamente distribuidos en el área estudiada.

Está constituida principalmente de gravas, arenas, arcillas y limos; los clásticos gruesos se presentan sin consolidar y los finos débilmente consolidados. La mayor parte de sus componentes son derivados de roas volcánicas de composición ácida principalmente. La forma de los clásticos varía de subredondeados a redondeados. Presenta generalmente una coloración café rojiza.

Eventualmente contiene capas de tobas andesíticas y lavas basálticas; algunas de ellas presentan evidencias de haber sido depositadas en cuerpos de agua, como en los afloramientos que se muestran sobre la carretera Durango-Cuencamé, a 8 km al NE de Guadalupe Victoria; algunas de estas lavas han sido cortadas en los pozos perforados para explotación de agua potable. Desde el punto de vista geohidrológico, es la unidad de mayor interés, ya que presenta muy buenas características estructurales que hacen que sea una excelente zona de recarga debido a su alta permeabilidad.

La Formación Los Llanos descansa tanto sobre las rocas mesozoicas como sobre las formaciones cenozoicas anteriormente descritas, excepto los depósitos aluviales recientes, forma la cima de la columna estratigráfica. Su espesor es uno de los puntos que más se presta a controversia. Enciso de La Vega (op. cit.) le asigna un espesor de 15 m, sin embargo, se tienen evidencias por la información de pozos perforados, de que el espesor es considerablemente mayor, especialmente en los valles de origen tectónico, en los que podría alcanzar varios cientos de metros.

Constituye precisamente la unidad fisiográfica de la región, la cual ha sido denominada "'Región de Los Llanos". Fisiográficamente se describe como amplias planicies, poco disectadas, en las que se desarrollan amplias superficies de cultivos. La edad de la formación está bien datada por la presencia de restos de mamut (algunos molares y posiblemente parte de un fémur descubiertos en la hacienda de Atotonilco, así como en otras localidades). Desde el punto de vista geohidrológico, es la unidad de mayor interés, ya que presenta muy buenas características estructurales que hacen que sea una excelente zona de recarga debido a su alta permeabilidad.

CUATERNARIO (PLEISTOCENO)

Formación Guadiana

Albritton (1958) asigna el nombre de Formación Guadiana a los derrames de basalto que afloran a 25 km al este de la ciudad de Durango, en el poblado Saltito de La Constancia.

Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color obscuro en superficie fresca que intemperiza a café obscuro, de textura afanítica con estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso.

Su localidad tipo se encuentra en la población de Cárdenas, localizada al SW de la ciudad de Durango, en donde se encuentra constituida exclusivamente por gravas con lentes arenosos, con un espesor que varía de 6 a 12 m.

En el área del acuífero está constituida por interdigitaciones de cuerpos arenosos gravillentos y arcillosos, que subyacen a basaltos cuaternarios.

Por otra parte, es sobreyacida por sedimentos aluviales recientes, distinguiéndose de éstos por su textura gravillenta y arenosa de color café claro parcialmente cementados por caliche, así como por la presencia de huesos y dientes de vertebrados de edad Pleistoceno.

Por la similitud litológica y posición estratigráfica, los basaltos del área se correlacionan con los de la localidad tipo, que se ubican en el Pleistoceno. Según Lyons (1975) la emisión de los basaltos ocurrió después del segundo colapso de la Caldera Chupaderos. Representan la última actividad volcánica del Neógeno y cubren grandes extensiones de terreno; por su color y forma son fáciles de identificar en campo. Se presentan en forma de derrames intercalados en el Conglomerado Polimíctico; volcanes y conos cineríticos. Los basaltos son de color gris oscuro a negro de textura afanítica que varía a fanerítica, puede ser compacta o vesicular dependiendo de su génesis, contiene plagioclasas con cristales de olivino y ferromagnesianos.

CUATERNARIO (HOLOCENO)

Está representado por interdigitaciones de sedimentos aluviales, de diferente granulometría, desde gravas, arenas, arcillas y limos no consolidados, mal clasificados y de composición variada, producto de la erosión de las rocas que afloran en la región, que han sido transportados por las corrientes de los ríos y arroyos hasta las regiones topográficamente más bajas, formando extensas planicies aluviales y lacustres. Cubre discordantemente tanto a las rocas volcánicas como a las secuencias clásticas cenozoicas y del Pleistoceno. Los depósitos lacustres constituyen los vasos y zonas circundantes de las Lagunas de Santiaguillo y porción oriente de Canatlán. Consisten principalmente de sedimentos arcillo-limosos de grano muy fino con abundantes sales de disolución, poco consolidados, que representan las zonas de lagunas de inundación.

4.2. Geología estructural

En el contexto estructural la región que cubre el acuífero está gobernado por una tectónica distensiva post-laramídica, que configuró una serie de altos y bajos estructurales que presentan un característico trend NW-SE. Dentro de este marco se considera que el Valle de Canatlán regionalmente constituye la porción meridional del graben de Santiaguillo, estructura afectada en su límite sur por derrames basálticos de fisura de edad Pleistoceno, que modificaron el patrón de drenaje de las corrientes fluviales. El análisis de lineamientos muestra que las estructuras de mayor extensión identificadas corresponden a fallas normales que se encuentran delimitando bloques estructurales, de longitudes considerables. Estas estructuras tienen una orientación NW, en tanto que los lineamientos que corresponden a sistemas de fracturamiento de carácter local se manifiestan en dirección general NE.

También se detectaron estructuras orientadas sensiblemente en dirección N-S, asociadas con fallas normales de 15 a 40 km de longitud, que representan una tercera tendencia estructural. Al analizar las tendencias estructurales de los lineamientos registrados se identificó la presencia de un patrón de fracturas con longitudes hasta de un km, orientadas en dirección E-W y NW; destaca también la presencia de lineamientos orientados con rumbo NE, que tiende a guardar cierto paralelismo con la orientación de los bloques estructurales sepultados bajo el aluvión.

Finalmente, las tendencias N-S y NW están estrechamente ligadas con los lineamientos regionales asociados a la tectónica del Basin and Range. Por otra parte, se infiere que los basaltos de fisura se emplazaron a través de una zona de debilidad que corresponde con un lineamiento regional de más de 150 km de longitud, orientado en sentido NW-SE, que atraviesa el extremo noroccidental de la zona. De igual forma, al analizar los cortes litológicos se detectó en el subsuelo del valle la presencia de dos bloques de rocas volcánicas que se encuentran parcialmente sepultados, entre 10 y 100 m, por sedimentos de facies de abanicos aluviales; estos bloques tienen una orientación hacia el NE. Este trend se considera que está asociado con la evolución de la Caldera Chupaderos, localizada 10 km al norte de la ciudad de Durango.

En la región se encuentran dos secuencias que parecen corresponder a dos terrenos distintos, al Guerrero y al Parral, cuyo contacto no fue posible observar pero que se infiere sea tectónico a partir de los estilos de deformación observados en campo, tanto de las unidades paleozoicas como de la cubierta del Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Presenta deformación dúctil con desarrollo de esquistosidad, plegamiento isoclinal, en calcetín y abundantes cabalgaduras, lo cual es característico de zonas de cizalla dúctil, en el Anticlinal Yerbaniz se observan apilamientos de cabalgaduras en las secuencias sedimentarias mesozoicas que podrían relacionarse al límite de los terrenos Parral y Sierra Madre. La acreción podría relacionarse a la Orogenia Laramide del Cretácico Superior al Cenozoico Inferior. Sobrepuesta a la anterior deformación, se desarrolló un sistema extensional orientado NW-SE, en el que se asocian fallas normales que bascularon a la Secuencia Andesítica y en una etapa tardía controla el emplazamiento de cuerpos subvolcánicos, calderas y domos de edad oligocénica. La siguiente fase de extensión tectónica con vulcanismo del Mioceno Superior se asocia a la apertura del Golfo de California. El último evento caracterizado por vulcanismo fisural Plio-Cuaternario, muestra la reactivación de las estructuras anteriores (Carta Geológico-Minera “Durango” G13-11 Escala 1:250,000. SGM, 1998).

A partir de este basamento andesítico, se generaron fallas anulares que sirvieron de conducto a la formación de calderas volcánicas y expulsaron material de afinidad riolítica. De esta forma, en el inicio de dichas calderas, los bloques rocosos de sus porciones centrales se hundieron, ocurriendo el flujo de los primeros derrames de ignimbritas y material piroclástico de caída libre que se identifican por cubrir discordantemente a las unidades rocosas consideradas como basamento local.

Después de la formación de estas primeras calderas y por un proceso de regeneración de actividad volcánica, se volvieron a producir fallamientos anulares que provocaron la extrusión de lavas de mayor viscosidad, éstas dieron origen a la formación de volcanes dómicos que fueron parcialmente sepultados por la emisión de nuevas fuentes de ignimbritas y tobas de caída libre, que se identifican en la actualidad por ocupar las porciones altas de las sierras vecinas.

Un evento posterior ocurrido durante el Plioceno-Cuaternario, que se relaciona con la tectónica de la apertura del Golfo de California, provocó el hundimiento de las unidades riolíticas por efectos de distensión combinado con el levantamiento de fallas normales. Este suceso dio origen a la formación de depresiones tectónicas o grabens en cadena, cuyo relleno se inició con la depositación de clásticos gruesos mal clasificados, con intercalaciones de derrames basálticos que se manifiestan con mayor abundancia en la porción sureste del área de estudio. El acuífero se aloja en una de estas depresiones tectónicas o grabens.

Los rasgos estructurales predominantes en la Cuenca de Canatlán son las fracturas y fallas a que fueron sometidas las rocas ígneas cenozoicas. Estas rocas que forman la sierra y que limitan el valle, por lo general se encuentran en posición horizontal o sub-horizontal. Sin embargo, son frecuentes los desplazamientos de falla y las rocas se encuentran fracturadas, lo cual indica que la zona fue sometida a esfuerzos tectónicos anteriores al Plioceno Tardío o Pleistoceno Temprano, ya que estos fenómenos no afectan a la formación Santa Inés que data de esta época.

Al norte de la cuenca, entre las sierras Cacaria y Coneto se encuentran una serie de alineaciones, montañosas de poca altura, paralelas entre sí, que parece ser deben su actual posición a una serie de fallas normales escalonadas. Desde las inmediaciones de Santa Teresa hasta el arroyo El Agua, se observa una falla normal que al noroeste de Santa Teresa, trunca una secuencia de tobas, poniéndola en contacto con otras de características diferentes.

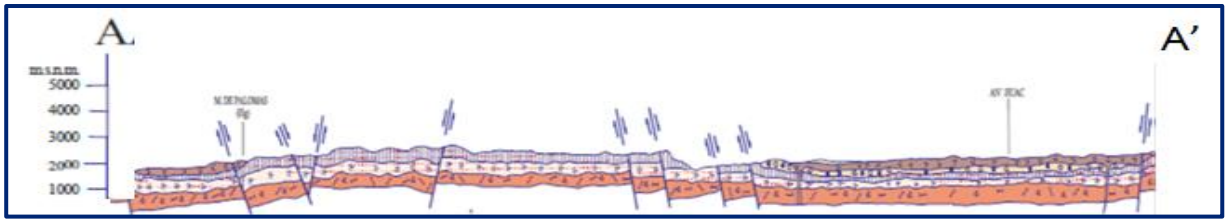
Esta misma falla, hacia el sureste, pone en contacto coladas de riolitas con una secuencia de tobas. Al occidente de El Carmen, cerca del rancho Las Cuevas, existen una serie de fallas normales. Todas estas fallas tienen una orientación NW. Al noroeste de San Rafael, sobre el camino que de este poblado conduce al rancho El Durangueño, se observó en el fondo de un arroyo, una falla de rumbo NE.

Además de los sistemas de fallas antes mencionados, numerosas fracturas de origen tectónico se presentan en todas las rocas volcánicas cenozoicas, expuestas por lo general en dos sistemas principales de rumbos NW y NE, además de otros sistemas de menor importancia que no pueden considerarse regionales. Estos dos sistemas de fracturamiento son verticales o tienen buzamientos cercanos a la vertical. La frecuencia de fallas normales, supone que los esfuerzos de tensión fueron los principales que actuaron en la zona, cuya edad se corresponde al Cenozoico Medio.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, geofísica e hidrogeológica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y de pie de monte, lacustres y eólicos, producto del intemperismo de rocas preexistentes, así como por conglomerados polimícticos que rellenan los amplios valles.

Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. 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. Localmente, la presencia de sedimentos lacustres así como lentes e intercalaciones de estratos de arcillas, ocasionan condiciones de semiconfinamiento; lo que provoca distintos niveles del agua subterránea en pozos y norias próximos ente sí. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, andesitas y basaltos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera: "Durango" G13-11 Durango y Sinaloa, Escala 1:250,000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

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, fluviales, de pie de monte, lacustres y eólicos, así como por conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle y disminuye gradualmente hacia los flancos y estribaciones de las sierras. Esta es la unidad que se explota actualmente en mayor proporción para satisfacer las necesidades de agua de la región. Debido a la existencia de sedimentos arcillosos, se presentan condiciones locales de semiconfinamiento.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, basaltos y en menor proporción andesitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2014, se realizaron 6 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores promedio de transmisividad varían entre **$0.21x10^{-3}$** y **$3.36x10^{-3}$ m^2/s**, con un valor promedio de **1.45×10^{-3} m^2/s**.

Los valores de conductividad hidráulica varían de **$1.74x10^{-5}$** a **$1.46x10^{-6}$ m/s (1.5 a 0.1 m/d)**, con un valor promedio de **7.86×10^{-6} m/s (0.7 m/d)**, que se asocian a sedimentos de granulometría fina. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

Sin embargo, para el propósito del balance de aguas subterráneas, se consideró un valor de rendimiento específico **Sy promedio** de **0.06**

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 2014, además de datos históricos de los años 2010 y 2012.

Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes en el periodo 2010-2014, únicamente se describen las configuraciones del 2014.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

En 2014 los valores de profundidad al nivel del agua subterránea variaron de 10 a 36 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle.

Los niveles estáticos más someros, de 10 a 14 m, se presentan al oeste de Canatlán y en la porción sur del acuífero, aumentando gradualmente conforme se asciende topográficamente.

Los más profundos, de 30 a 36 m, se registran en la porción norte y suroriental, hacia los poblados Donato Guerra y Morcillo, respectivamente.

En la porción central las profundidades varían de 14 a 20 m (figura 4).

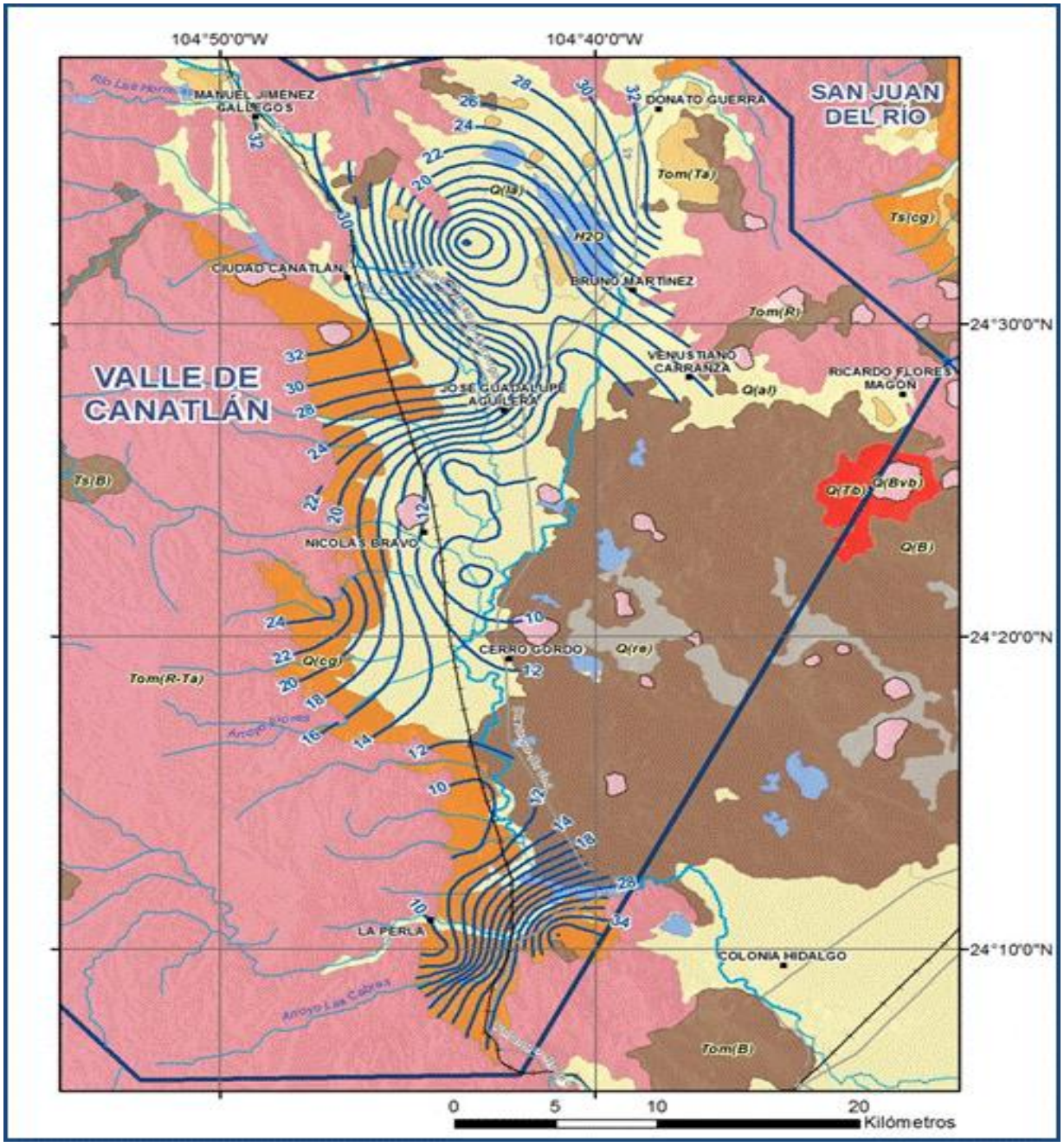


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2014)

5.4.2. Elevación del nivel estático

En 2014 se registraron valores de carga hidráulica de 1,950 a 1,880 msnm, que se incrementan de la zona sur del valle hacia el norte y hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero, mostrando una red de flujo subterráneo con dirección preferencial de norte a sur, con alimentaciones provenientes de la porción occidental.

Las menores elevaciones, de 1880 a 1890 msnm, se registraron al sur del acuífero, hacia el límite con el acuífero Valle del Guadiana, y las mayores, de 1,940 a 1,950 msnm, en la porción norte, hacia los poblados Donato Guerra y Manuel Jiménez Gallegos (figura 5).

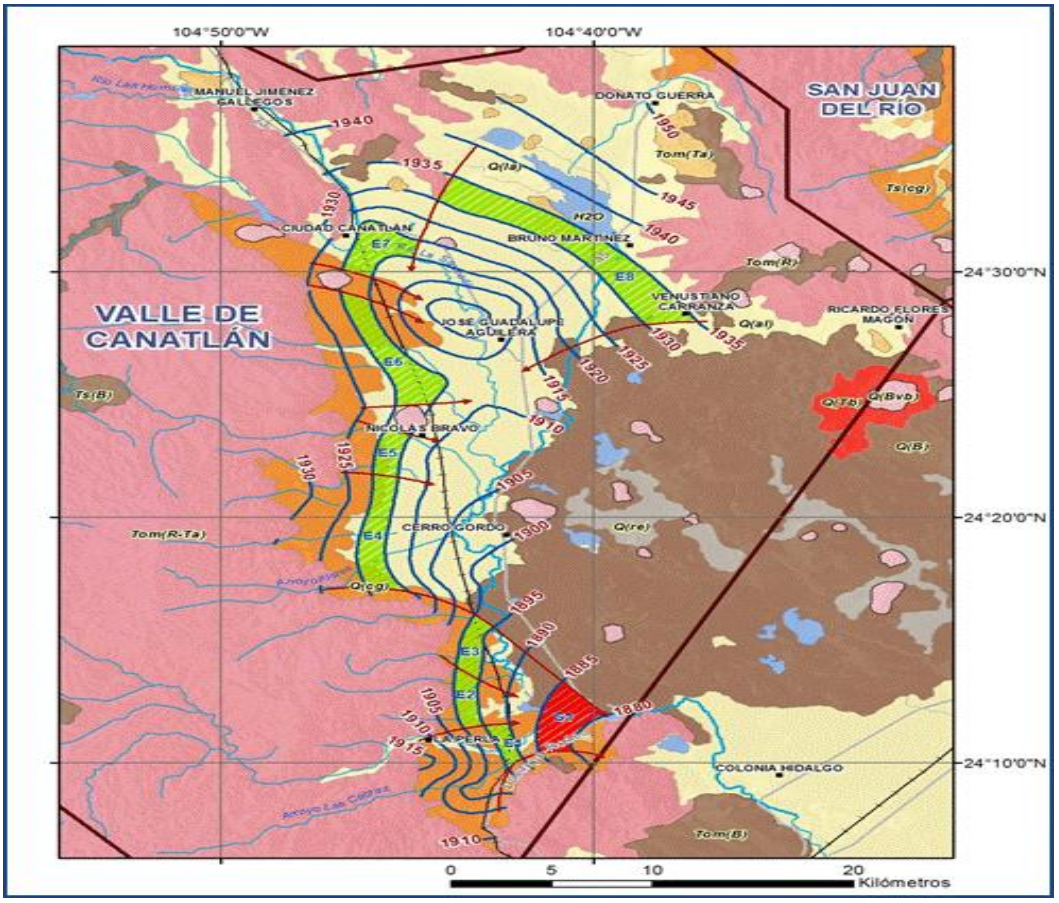


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2014)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2014, registra abatimientos de 1.0 a 20.0 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.25 a 5.0 m, con un promedio de 3.5 m.

La zona del valle donde se encuentra la principal zona de explotación presenta abatimientos de 2 a 4 m anuales.

En la porción norte del acuífero, hacia el poblado Donato Guerra, se observaron recuperaciones (figura 6).

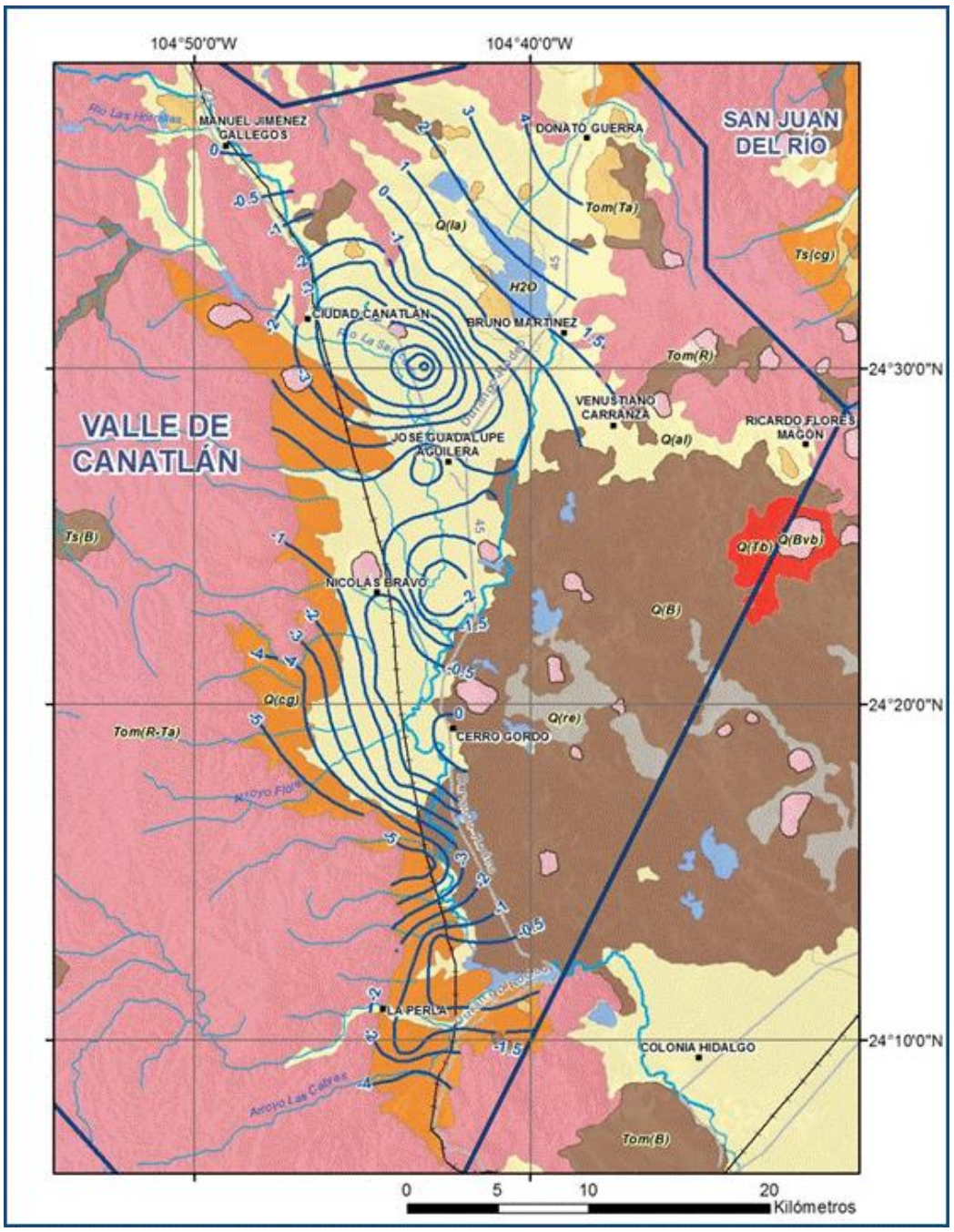


Figura 6. Evolución media anual del nivel estático en m (2010-2014)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2014, se tomaron 5 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, 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.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 53 a 422 ppm, que no sobrepasan el límitemáximo permisible de 1000 ppm establecido en dicha la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano.

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 5 muestras de agua, 2 se clasifican como C_2S_1, que representa contenido medio de sales y baja concentración de sodio intercambiable, 2 se clasifican como C_1S_1, definida como agua con bajo contenido de sales y baja concentración de sodio. Estas dos clasificaciones del agua son altas para uso agrícola sin restricción alguna. Sólo una de las muestras se clasifica como C_3S_2, que corresponde a agua con alto contenido de sales y contenido medio de sodio, lo cual significa que su uso agrícola está restringido a suelos con buen drenaje y aplicación de lavado de ellos Con respecto a las familias del agua por ion dominante, las que predominan son bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-mixta, que sugieren el desarrollo de reacciones de intercambio catiónico, en este caso de tipo directo, cuando el sodio de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por calcio del agua subterránea.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2014, se identificaron un total de 1,185 aprovechamientos, 495 pozos, 512 norias, 175 tajos y 3 manantiales; del total de obras, 1,152 están activas y las restantes 33 inactivas.

De acuerdo con su clasificación por usos, de los 1,152 obras activas, 786 se utilizan en la agricultura, 117 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 92 para uso doméstico, 64 para uso pecuario, 3 para uso industrial y 90 para usos múltiples.

El volumen de extracción asciende a **65.4 hm³ anuales**, de los cuales 60.6 hm³ (92.7 %) se destinan al uso agrícola, 3.4 hm³ (5.2%) se utilizan para uso público-urbano, 0.2 hm³ (0.3%) para uso pecuario, 0.2 hm³ (0.3 %) para uso industrial y 1.0 hm³ (1.5 %) para usos múltiples.

Adicionalmente, a través de **manantiales** se descarga un caudal de 13 lps, que representa un volumen de **0.4 hm³** anuales, destinados a los usos doméstico-pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2014, en una superficie de **524 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = 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:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que el volumen de agua para uso público-urbano es pequeño, sólo se considera la recarga incidental por el retorno de riego agrícola (Rr).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

Rv = Recarga vertical
Rr = Recarga incidental por retorno agrícola
Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal
B = Bombeo
Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR = Evapotranspiración Real.
Dm = Descarga de manantiales
ΔV(S)=Cambio de almacenamiento

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

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm - Rr - Eh \pm \Delta VS \qquad (2)$$

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 del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2014, mostrada en la figura 5.

Con base en ellas 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:

$$Q = T * B * i$$

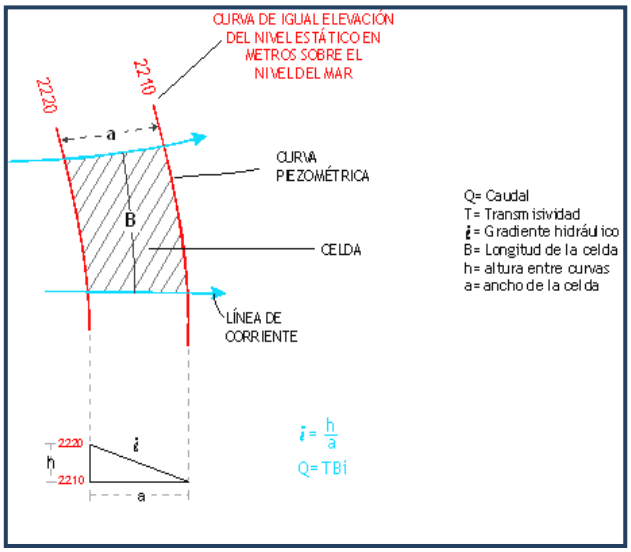
Donde:

Q =Caudal (m^3/s)

T = Transmisividad (m^2/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.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **15.2 hm^3/año**, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2014)

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	3135	1115	5	0.00448	0.0005	0.0070	0.2
E2	4100	1200	5	0.00417	0.0005	0.0085	0.3
E3	4070	1365	5	0.00366	0.0005	0.0075	0.2
E4	8780	1590	5	0.00314	0.0010	0.0276	0.9
E5	3390	1220	5	0.00410	0.0010	0.0139	0.4
E6	9085	1600	5	0.00313	0.0073	0.2073	6.5
E7	4870	1415	5	0.00353	0.0073	0.1256	4.0
E8	14745	2190	5	0.00228	0.0025	0.0842	2.7
						TOTAL	15.2

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, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.1.3 Retornos de riego (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se considera un 10% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad al nivel del agua subterránea y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo.

De esta manera, tomando en cuenta que el uso agrícola utiliza un volumen promedio anual de 45.10 hm^3, de los cuales 27.1 hm^3 corresponden a agua subterránea y 18.0 hm^3 de agua superficial al aplicar el 10% de retornos de riego como recarga efectiva al acuífero, se obtiene un volumen promedio anual de 7.20 hm^3. **Rr = 7.20 hm^3anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en una pequeña área de niveles freáticos someros y la descarga a través de manantiales (Dm).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción actual por bombeo asciende a **49.9 hm^3 anuales.**

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2014.

Su valor estimado es de **0.9 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m²/s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
S1	5661	3049	5	0.00164	0.0003	0.0028	**0.1**
						TOTAL	**0.1**

7.2.3. Evapotranspiración real (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. El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 16.2 °C y 471.8 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 437.2 mm anuales, como se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

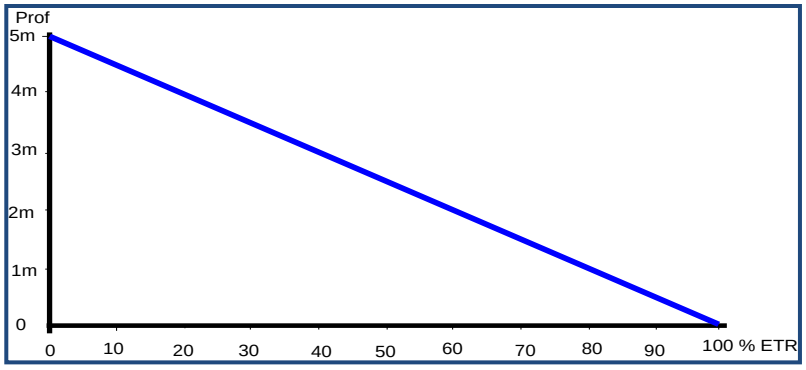
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.2		
P(mm) =	471.8	P^2 =	222595.24
L =	917.5764	L^2 =	841946.45
ETR (mm)	437.2		

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.



El área de niveles freáticos someros es de 5.7 km^2 en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 4.5 metros, por lo que de acuerdo con la gráfica anterior le corresponde el 10 % de la lámina de evapotranspiración obtenida, que fue de 437.2 mm para el periodo 2010-2014.

Por lo tanto, que ETR = 5.7 km^2 * 0.4372 m * 0.1 = 0.2 hm^3. **ETR = 0.25 hm^3 anuales**.

7.2.4. Descarga por manantiales (Dm)

La descarga a través de los manantiales se estimó en 13 lps, que representa un volumen anual de 0.40 hm^3. **Dm = 0.40 hm^3 anuales.**

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de las configuraciones de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2014.

Con base en ella se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

Para el periodo 2010-2014 en la superficie de balance de 524 km^2, se obtuvo un abatimiento promedio de 3.0 m y un cambio de almacenamiento promedio anual, que afectado por el rendimiento especifico el promedio es **ΔV(S) = - 12.0 hm^3 anuales**.

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 a lo largo de los escurrimientos superficiales, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm - Rr - Eh \pm \Delta VS$$

$$Rv = 49.9 + 0.09 + 0.2 + 0.40 - 7.2 - 15.2 - 12.0$$

$$Rv = 16.2\ hm^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = Rv + Eh + Rr$$

$$R = 16.2 + 15.2 + 7.2$$

$$R = 38.6\ hm^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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 en forma de recarga natural como incidental.

Para este caso su valor es **38.6 hm³/año**, de los cuales 29.7 hm^3 son recarga natural y 8.9 hm^3 recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Valle de Canatlán, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de 0.7 hm^3 anuales, de los cuales 0.1 hm^3 corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal que aun en pequeña cuantía ocurren hacia el acuífero vecino Valle del Guadiana, 0.2 hm^3 por evapotranspiración y 0.4 hm^3 a través de la descarga de los manantiales.

DNC= 0.7 hm^3 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 **62,725,657 m³ anuales** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua 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.

$$DMA = R - DNC - VEAS$$
$$DMA = 38.6 - 0.7 - 62.725657$$
$$DMA = -24.825657\ hm^3/año$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **24,825,657 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio de Actualización Hidrogeológica de los Acuíferos Madero-Victoria y Vicente Guerrero-Poanas, en el estado de Durango. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2014. Estudio Geohidrológico para la Elaboración del Reglamento Específico de los Acuíferos Valle de Santiaguillo, Valle de Canatlán, Valle del Guadiana, Madero-Victoria y Vicente Guerrero-Poanas, en el estado de Durango. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.