CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

## SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

## GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

# ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DEL GUADIANA (1003), 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 ..... 8
3.3. Hidrografía ..... 9
3.4. Geomorfología ..... 11
**4. GEOLOGÍA ..... 12**
4.1. Estratigrafía ..... 15
4.2. Geología estructural ..... 25
4.3. Geología del subsuelo ..... 27
**5. HIDROGEOLOGÍA ..... 28**
5.1. Tipo de acuífero ..... 28
5.2. Parámetros hidráulicos ..... 28
5.3. Piezometría ..... 29
5.4. Comportamiento hidráulico ..... 29
5.4.1. Profundidad al nivel estático ..... 29
5.4.2. Elevación del nivel estático ..... 30
5.4.3. Evolución del nivel estático ..... 32
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea ..... 33
**6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA ..... 33**
**7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS ..... 34**
7.1. Entradas ..... 34
7.1.1. Recarga vertical (Rv) ..... 35
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) ..... 35
7.1.3. Recarga incidental (Ri) ..... 37
7.2. Salidas ..... 37
7.2.1. Bombeo (B) ..... 37
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) ..... 38
7.2.3. Evapotranspiración (ETR) ..... 38
7.2.4. Descarga por manantiales (Dm) ..... 40
7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S) ..... 40
**8. DISPONIBILIDAD ..... 41**
8.1. Recarga total media anual (R) ..... 41
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) ..... 42
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) ..... 42
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) ..... 42
**9. BIBLIOGRAFÍA ..... 44**

# 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 del Guadiana, definido con la clave 1003 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-sur del estado de Durango, entre los paralelos 23° 27' y 24° 29' de latitud norte y 104° 19' y 105° 08' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,817 km$^2$.

Limita al norte con el acuífero Valle de Canatlán; al noroeste con Tepehuanes-Santiago, al noreste con Madero-Victoria; al este con Vicente Guerrero-Poanas, al sureste con Valle del Mezquital, todos ellos pertenecientes al estado de Durango; al oeste con los acuíferos Río Presidio del estado de Sinaloa, y Acaponeta-Cañas, y al sur con el acuífero San Pedro Tuxpan, estos dos últimos pertenecientes al estado de Nayarit (figura 1).

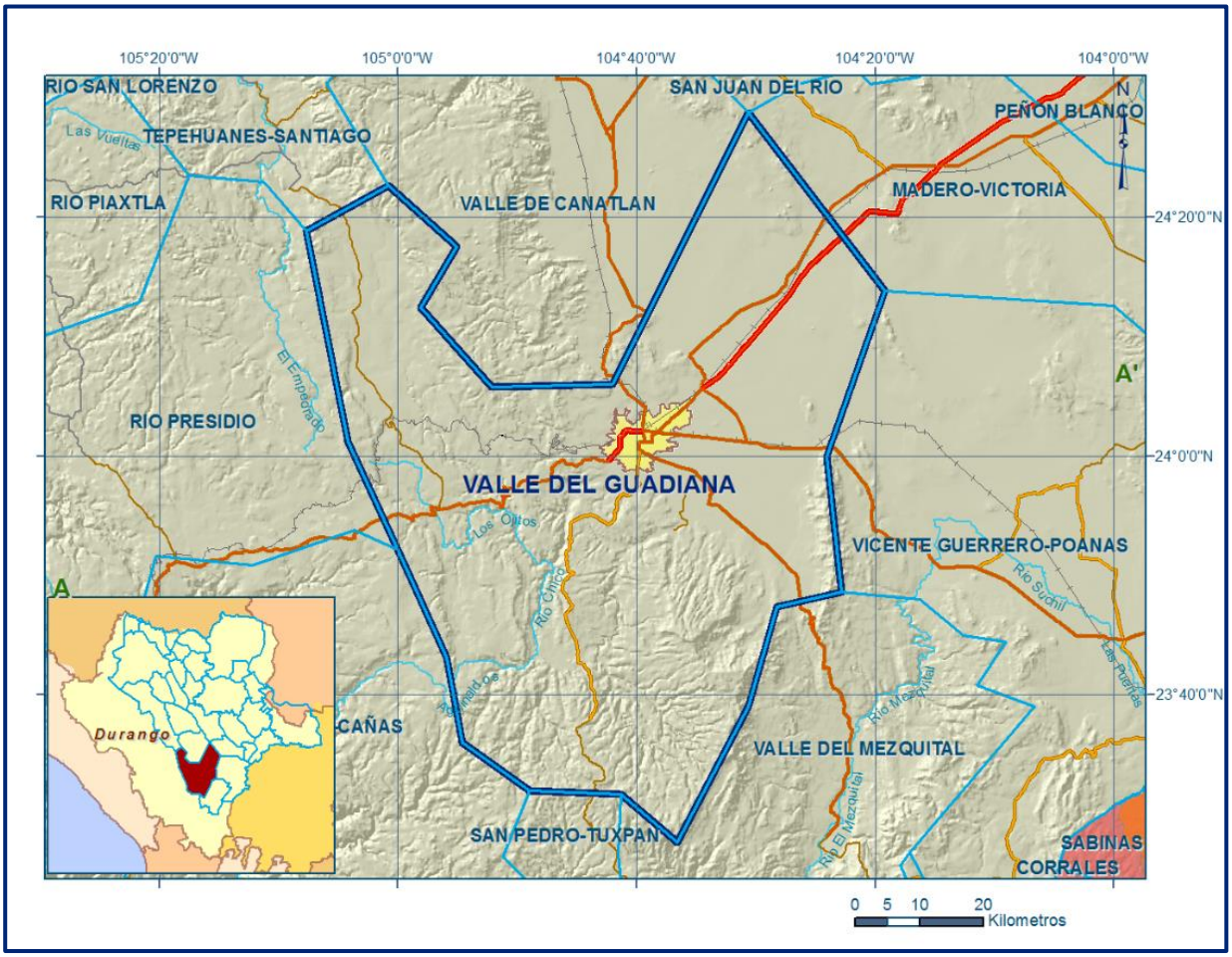



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero comprende la mayor parte de municipio de Durango y porciones menores de Canatlán, Pánuco de Coronado, Mezquital y Nombre de Dios.

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 1003 VALLE DEL GUADIANA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1 | 104 | 55 | 54.3 | 23 | 43 | 8.0 |
| 2 | 105 | 0 | 2.5 | 23 | 52 | 8.6 |
| 3 | 105 | 4 | 12.0 | 24 | 1 | 12.0 |
| 4 | 105 | 7 | 38.7 | 24 | 18 | 53.3 |
| 5 | 105 | 0 | 48.8 | 24 | 22 | 38.1 |
| 6 | 104 | 55 | 5.0 | 24 | 17 | 31.7 |
| 7 | 104 | 58 | 7.4 | 24 | 12 | 28.4 |
| 8 | 104 | 52 | 8.2 | 24 | 5 | 48.8 |
| 9 | 104 | 42 | 0.0 | 24 | 6 | 0.0 |
| 10 | 104 | 30 | 36.0 | 24 | 28 | 48.0 |
| 11 | 104 | 19 | 12.0 | 24 | 13 | 48.0 |
| 12 | 104 | 24 | 0.1 | 24 | 0 | 0.0 |
| 13 | 104 | 22 | 48.0 | 23 | 48 | 36.0 |
| 14 | 104 | 28 | 12.0 | 23 | 47 | 24.0 |
| 15 | 104 | 30 | 36.0 | 23 | 39 | 0.0 |
| 16 | 104 | 36 | 36.0 | 23 | 27 | 36.0 |
| 17 | 104 | 41 | 19.8 | 23 | 31 | 39.0 |
| 18 | 104 | 48 | 56.3 | 23 | 31 | 56.3 |
| 19 | 104 | 54 | 36.3 | 23 | 36 | 0.2 |
| 1 | 104 | 55 | 54.3 | 23 | 43 | 8.0 |

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Valle del Guadiana 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 1003 Valle del Guadiana, en el Estado de Durango", a través del Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero Valle del Guadiana, A.C., órgano auxiliar del Consejo de Cuenca Río Presidio al San Pedro, el 29 de agosto de 2008, en la Ciudad de Durango, Estado de Durango, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de julio 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"*. La superficie del acuífero se encuentra parcialmente vedada. En la porción oriental y nororiental de su territorio está en vigor el "*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del Valle de Guadiana, Dgo."*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de diciembre de 1956.

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

En la mayor parte del territorio 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 las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 112 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 2.

El uso principal es el público-urbano. En el territorio del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 052 "Estado de Durango", módulos II, IV y V, Guadalupe Victoria, Peña del Águila y Santiago Bayacora, respectivamente. Los usuarios se encuentran organizados a través del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Valle del Guadiana, A.C., instalado el 14 de octubre 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.

**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 km$^2$ 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. En el acuífero esta subprovincia Gran Meseta está representada por las principales elevaciones topográficas: Mesa Las Cebollas, Cerros La Calavera, Altos de Las Vacas y Cerro Prieto, ubicados en la región sur-suroccidental, cuya elevación alcanza 2,300 msnm.

En la porción suroriental la subprovincia está representada por la Sierra El Registro, cuya elevación supera los 2,600 msnm, en la que se generan escurrimientos superficiales que descargan hacia las planicies.

La superficie restante del acuífero se ubica en la subprovincia Sierras y Llanuras de Durango, está representada por el Valle de Guadiana; en la porción norte se presenta una serie de lomeríos y sierras de basalto, cuya elevación promedio es de 1,900 msnm, que presentan pendientes suaves y prácticamente sin corrientes superficiales.

### 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 suroccidental 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.

Clima C (w2), que es 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 grados centígrados, su cociente precipitación/temperatura es mayor de 55.

Por último, el clima es de tipo C(w1) y C(w0), que presentan las mismas características que el C(w2) variando únicamente en el grado de humedad, que corresponde con el intermedio y el más seco de los subhúmedos, respectivamente, de modo que el cociente precipitación/temperatura en el primer caso se encuentra entre 43.2 y 55.0; y para el segundo caso es menor que 43.2.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 12 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Colonia Insurgentes, Compañía Ganadera El Carmen, El Pueblito, Las Bayas, Navíos Viejos, Otinapa, Peña del Águila, Santa Bárbara, Santiago Bayacora, Durango, Santa Bárbara (DGE) y La Flor, con diferentes periodos de registro, que comprenden de 1941 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 **530.9 mm** y **17.5 °C** respectivamente.

De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,832.2 mm anuales.**

### 3.3. Hidrografía

El acuífero Valle del Guadiana 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, subcuencas de los Ríos Tunal, Santiago y Durango.

En el territorio que cubre el acuífero se localiza una gran cantidad de corrientes superficiales la mayoría de ellas de régimen intermitente, ríos perennes, lagunas, zonas inundables. Las principales corrientes superficiales son los ríos La Sauceda, Tunal y Santiago de Bayacora, con una gran cantidad de arroyos afluentes en ambas márgenes.

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.

El Río El Tunal se sitúa en el centro y noreste del acuífero, su punto inicial se ubica al oeste de la localidad El Durazno en la cortina de la Presa Presidente Guadalupe Victoria.

El punto final se sitúa al sur de la localidad Las Raíces, sale del acuífero Valle del Guadiana a la altura de la localidad San Rafael del Arenal, al sur de la laguna Colorines. El Río Santiago de Bayacora se localiza al este del acuífero. Se origina al suroeste de la localidad Miguel de Las Maravillas de Arriba en la cortina de la presa Santiago de Bayacora. Su punto final se localiza al sur de la localidad El Arenal al pie del cerro El Arenal, punto donde se convierte en tributario del río Tunal.

En el caso de las lagunas, lagos y zonas inundables, existen en gran número, aunque en su mayoría son de pequeñas dimensiones. En la región nororiental se encuentran todas las zonas inundables. En la subcuenca del Río Tunal se localizan lagos y lagunas, en la subcuenca del Río Santiago solo hay una zona inundable y en la porción de la subcuenca Río Durango que está dentro del acuífero existen tanto zonas inundables como lagunas.

Las principales presas dentro de los límites del acuífero se localizan: en la subcuenca Río Tunal, la presa Presidente Guadalupe Victoria, presa Nevería y presa El Cañón; en la subcuenca Río Santiago, las presas Santiago Bayacora y San Lorenzo; y en la subcuenca Río Durango, las presas Navacoyán, El Hielo, Providencia (La Tinaja) y Garabitos. La presa Presidente Guadalupe Victoria tiene una capacidad total de 80 $hm^3$, sirve para regular los escurrimientos del Río Tunal y junto con otras presas derivadoras abastecen al Distrito de Riego 052. La Presa Santiago Bayacora tiene una capacidad total de 130 $hm^3$ y controla los escurrimientos de los ríos Las Tinajas y Santiago Bayacora, para después conducirlas y ser aprovechadas en riego en Distrito de Riego 052.

El embalse de la presa San Lorenzo se localiza al sur de la Colonia Felipe Ángeles, tiene una capacidad de almacenamiento de 1.6 $hm^3$.

La presa La Providencia se ubica al norte de la localidad José María Morelos (La Tinaja) y tiene una capacidad de almacenamiento de 0.57 $hm^3$.

El agua de estas dos últimas presas se utiliza para riego y abrevadero. La presa Garabitos se ubica al oeste de la localidad Lázaro Cárdenas, tiene una capacidad de almacenamiento de 4.5 $hm^3$ que se utilizan para riego agrícola.

La presa derivadora Navacoyán controla el escurrimiento sobre el Río Tunal, al norte de la estación Dalila del ferrocarril y al oeste de la localidad Antonio Castillo. La presa El Hielo es una presa de almacenamiento que se localiza al norte del cerro La Cruz.

### 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 las porciones oriental y nororiental del acuífero; representado por el Valle de Guadiana, orientado en dirección general N-S a lo largo de 45 km, tiene una altitud promedio de 1,860 msnm y muestra una inclinación sensible hacia el noreste. Está limitado al poniente pos rocas volcánicas ácidas mientras que al norte y noreste se encuentra delimitado por rocas basálticas. A lo largo de él escurren los ríos el Tunal, Sauceda, Santiago Bayacora y Las Vacas que drenan hacia el oriente y confluyen al Río Mezquital. El valle tiene una densidad de drenaje baja.

Los lomeríos están ubicados en una pequeña zona ubicada en la porción centro-sur, conformados por rocas riolíticas de la serie volcánica superior, que han condicionado el desarrollo de una combinación de drenajes de tipo paralelo y subparalelo, de baja densidad y pendientes que varían 5 a 7°. Las mesetas se presentan en los extremos norte y noreste, están representadas por coladas de basaltos de olivino de edad cuaternaria, que se caracterizan por su estructura vesicular, sus diaclasas y fracturas.

Presentan un desnivel máximo de 40 m con respecto al valle y una altitud máxima de 1,900 msnm, pendientes bajas y sin densidad de drenaje. En la porción occidental se presentan mesetas conformadas por rocas riolíticas que tienen altitudes hasta de 2,200 msnm y un desnivel de 300 m con respecto al valle. En los flancos las mesetas escaso drenaje de tipo subparalelo.

Las sierras están representadas por la Sierra El Registro que se localiza al sureste de la zona y orientada en sentido N-S, constituida por tobas en su parte inferior y por ignimbritas en la porción superior. Tiene una altitud de 2600 msnm y un desnivel promedio de 700 m con respecto al valle.

La sierra La Paila se ubica en el extremo noreste y está orientada al NW, también conformada por rocas riolíticas.

La diferencia de pendiente y del patrón de drenaje que existen 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.

## 4. GEOLOGÍA

La geología regional de la zona de estudio está dominada por la secuencia mesozoica representada por las cubiertas de los Terrenos Guerrero y Parral (?) (Figura 2).

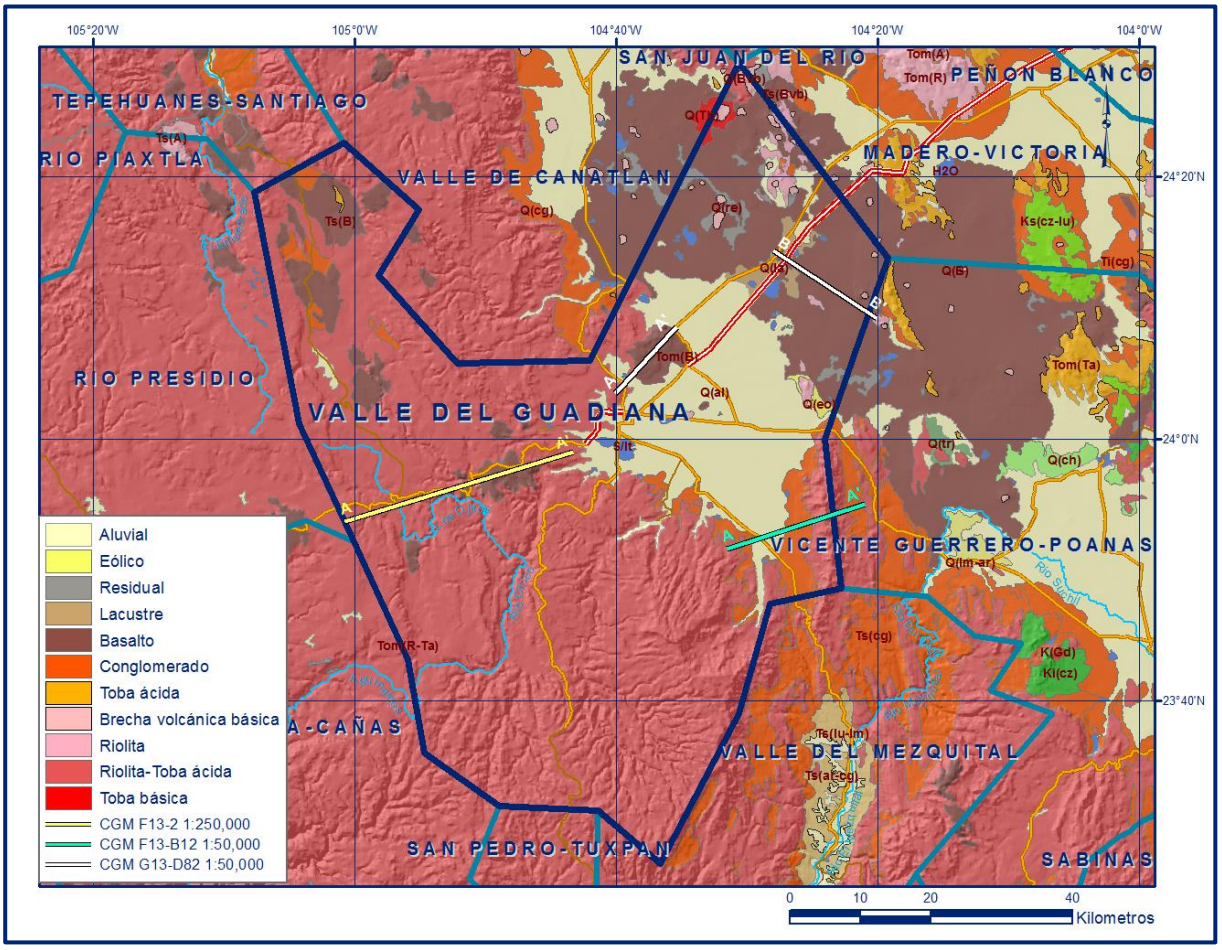



Figura 2. Geología general del acuífero

Su base está constituida por una secuencia de metareniscas y pizarras con lentes de calizas que tiene fauna de *Crassicellariabrevis, C. Massutiana, Cr. Intermedia y Calpinella Alpina*, que las ubican en el Tithoniano, las cuales fueron colectadas en la región de Pueblo Nuevo y son correlacionables con las litologías de las localidades Taxicaringa y Copala (Carta Geológica Minera "El Salto" F13-2, escala 1:250,000).

Cubriendo discordantemente, aflora un conglomerado basal polimíctico, constituido por fragmentos de pizarra y cuarzo metamórfico, de edad tentativa Neocomiano.

Sobreyaciendo aflora un paquete de andesitas metamorfizadas, que corresponden a una secuencia volcánica marina que aflora en las zonas de Taxicaringa, La Quebrada, La Guásima y Santa maría de Gracia.

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 la Formación Mezcalera que se considera pertenece al Terreno Parral. Intrusionando a las unidades antes mencionadas, existe una cuarzodiorita de edad Cretácico Superior. En la zona de barrancas, en discordancia angular sobre meta-andesitas, se observa una secuencia volcánica correspondiente al Supergrupo Volcánico Inferior, constituida por derrames y brechas volcánicas de composición andesítica, que por correlación se ubican en el Paleoceno-Eoceno.

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.

Ambas unidades tienen una edad que las ubica en el Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano. Sobreyaciendo discordantemente a estos conglomerados se depositaron brechas coignimbríticas que representan los centros de emisión volcánica del Oligoceno Temprano. Estos depósitos están cubiertos discordantemente por un paquete de brechas volcánicas riolíticas e ignimbríticas del Supergrupo Volcánico Superior, de edad Oligoceno Temprano a Medio, que afloran ampliamente en toda la región.

Todas las unidades anteriormente descritas han sido afectadas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos de composición granítico-granodiorítico que forman parte del Batolito de Sinaloa, datado en diferentes localidades con una edad Paleoceno-Eoceno.

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 (figura 2). 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 cenozoicos (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). La sucesión de eventos magmáticos ocurridos se encuentra 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:

**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; 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 1400 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.

## 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). La Sierra Madre Occidental está conformada por dos potentes secuencias ígneas, la más antigua constituida por rocas volcánicas intermedias cuyas edades varían de 100 a 45 Ma; la más reciente está compuesta por ignimbritas de composición riolítica y rioadacítica del Oligoceno y Mioceno. Estructuralmente, la tectónica de distensión del Cenozoico Superior fue la causante de los grabens y fallas normales de la cubierta superior. La estructura volcánica de mayor importancia es la "Caldera de Chupaderos", que fue el centro de emisión de los grandes depósitos de ignimbrita; otra importante fuente de localizaba al occidente, fuera del área de estudio, en la región correspondiente a la parte central de la Sierra Madre Occidental.

Las fallas son del tipo normal y presentan desplazamientos desde algunos metros hasta 300 m. Las más importantes son la falla Chupaderos, causante de que la mitad oriental de la caldera se encuentre hundida, y la falla Garabitos, localizada en la porción sur; finalmente al sur del poblado Héroe de Nacozari se encuentra una falla con dirección de NNW-SSE. En el flanco inferior de todas ellas se acumulan depósitos de relleno.

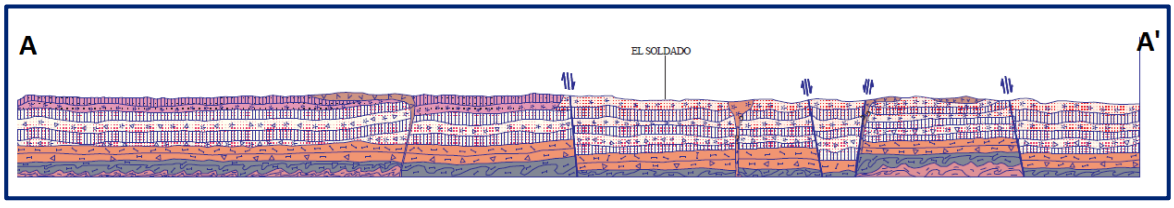
## 4.3. Geología del subsuelo

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.

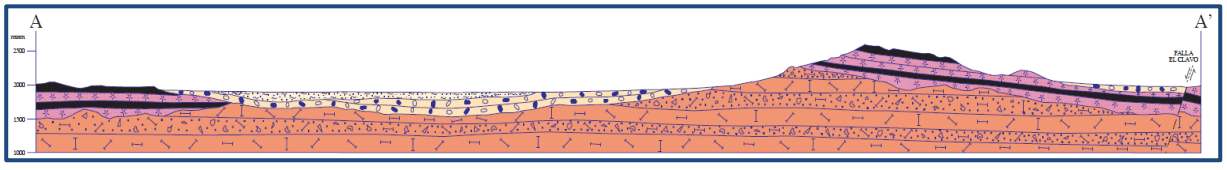
Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante 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.

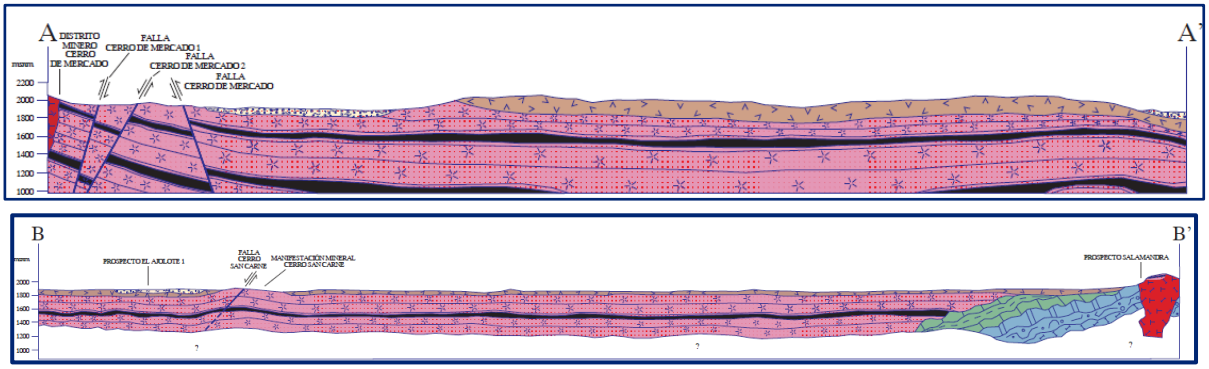
A mayor profundidad las calizas constituyen sistemas acuíferos profundos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Esta secuencia de rocas calcáreas y arcillosas está intrusionada por cuerpos granodioríticos y pórfidos traquíticos y riolíticos (figura 3).




Fuente: Carta Geológico-Minera: F13-2 “El Salto” Esc.: 1:250,000 (SGM, 2000)




Fuente: Carta Geológico-Minera F13-B12 “Santiago Bayacora”, Esc.: 1:50,000 (SGM, 2015)




Fuente: Carta Geológico-Minera G13-D82 "Durango Este", Esc.: 1:50,000 (SGM, 2015)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales, de pie de monte y lacustres, así como por conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle. 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 destacan las 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 cuando a profundidad desaparece el fracturamiento.

A mayor profundidad las calizas constituyen sistemas acuíferos profundos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

### 5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2014, se realizaron 9 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 **$0.75x10^{-3}$** y **$26.7x10^{-3}$ $m^2/s$**, con un valor promedio de **$6.1\ x10^{-3}$ $m^2/s$**.

Los valores de conductividad hidráulica varían de **2.29 x10$^{-4}$** a **5.28 x10$^{-6}$ m/s (19.8 a 0.5 m/d)**, con un valor promedio de **6.9 x 10$^{-5}$ m/s (6.0 m/d)**, que se asocian a sedimentos de granulometría media a 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 **0.1.**

### 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 del año 2012. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes en el periodo 2012-2014, 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 4 a 75 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 4 a 10 m, se registraron en el centro del valle y en la porción norte del área urbana de la ciudad de Durango, aumentando gradualmente, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 50 a 75 m, se presentaron en la porción suroriental, hacia el límite con el acuífero Valle del Mezquital (figura 4).

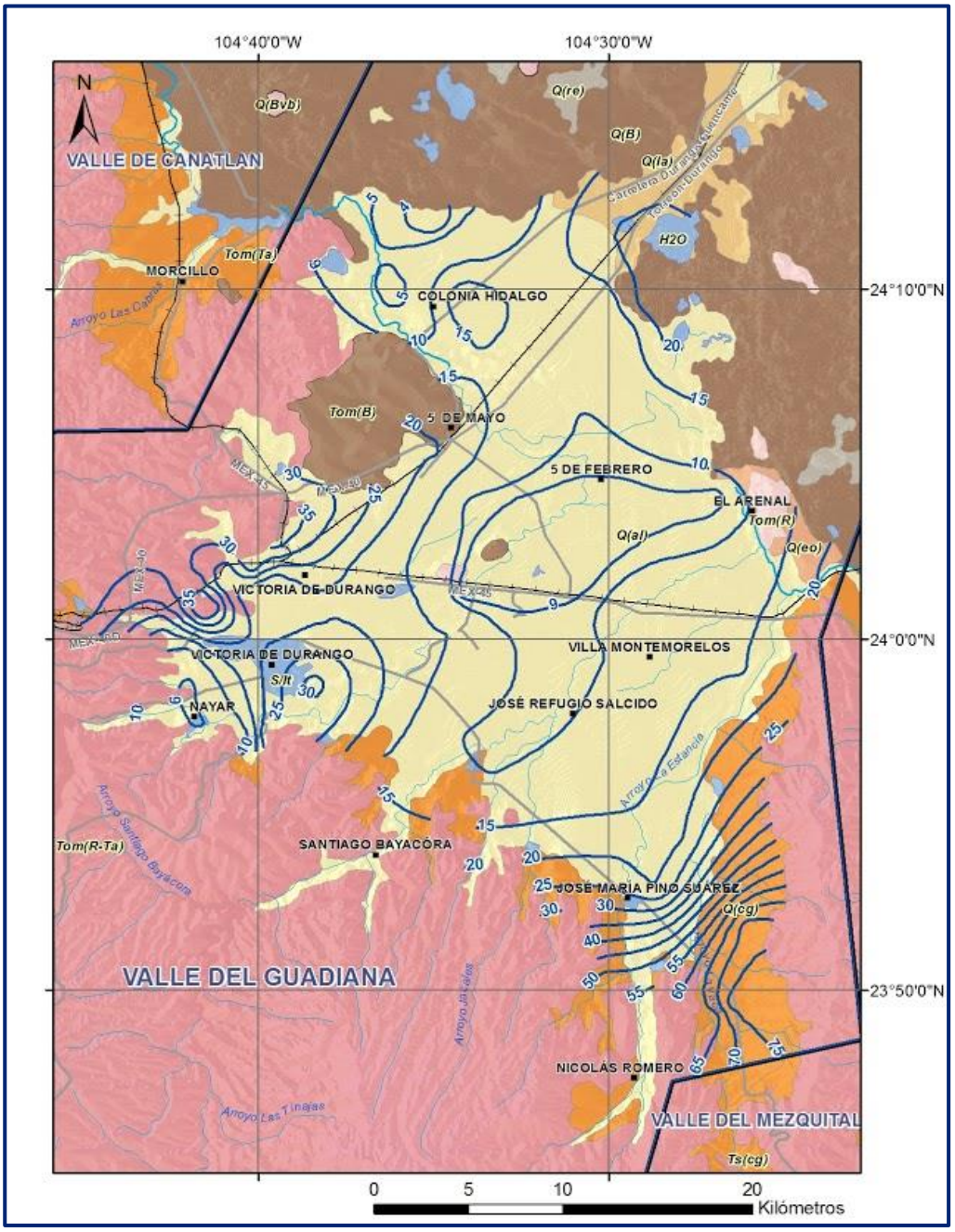



Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2014)

### 5.4.2. Elevación del nivel estático

En 2014 se registraron valores de carga hidráulica de 1842 a 1904 msnm, que se incrementan de la zona oriental del valle hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero, mostrando una red de flujo subterráneo con dirección preferencial oeste-este y noroeste-sureste, con alimentaciones provenientes de la porción suroriental y nororiental.

Las menores elevaciones, de 1842 a 1580 msnm, se obtuvieron al oriente del acuífero, hacia el límite con el acuífero Vicente Guerrero-Poanas, y los mayores, de 1890 a 1904 msnm, en la porción occidental (figura 5).

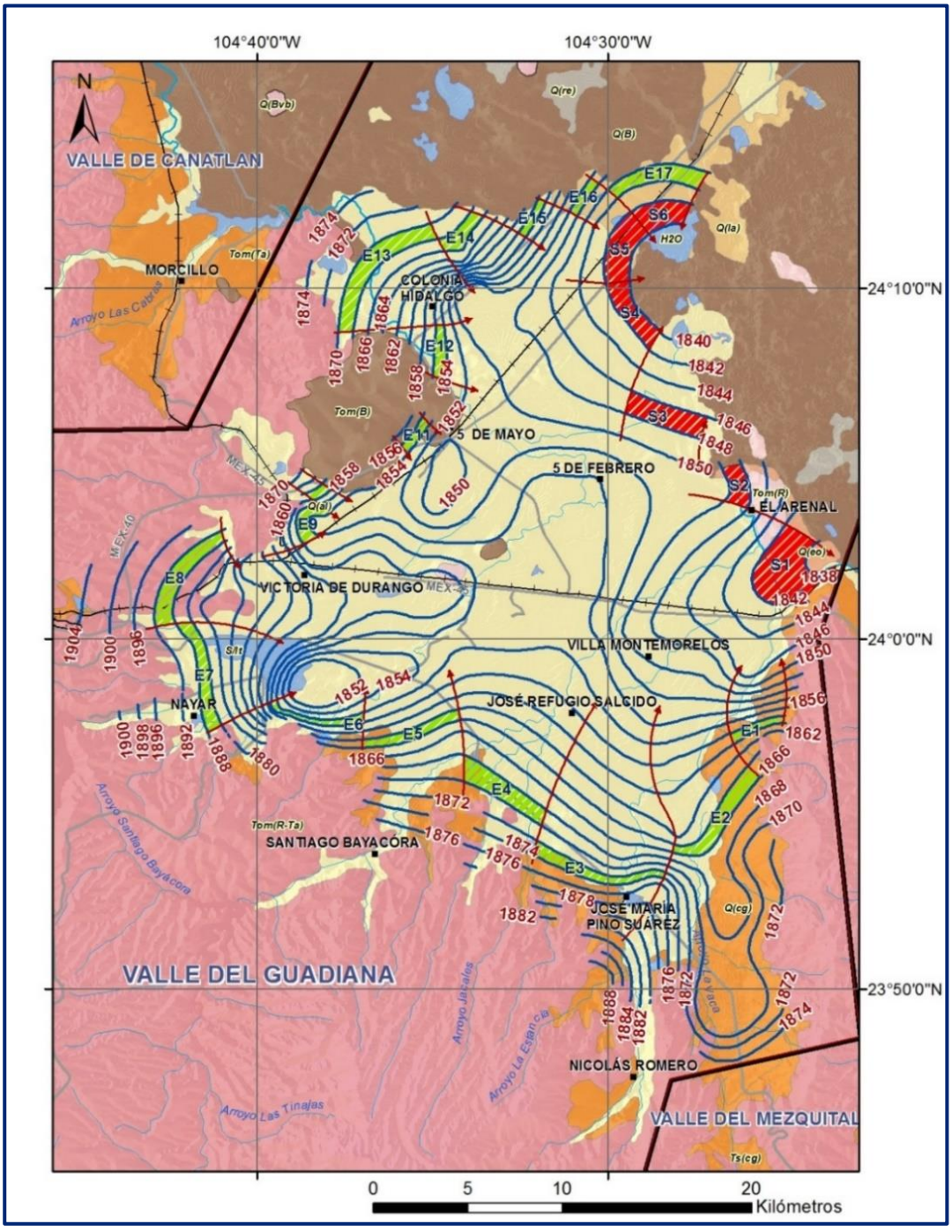



Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2014)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2012-2014, registra abatimientos de 0.5 a 6.0 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.25 a 3.0 m, con un promedio de 1.0 m. La zona del valle donde se encuentra la principal zona de explotación presenta abatimientos de 2 a 4 m, es decir un promedio de 1.5 m anuales (figura 6).

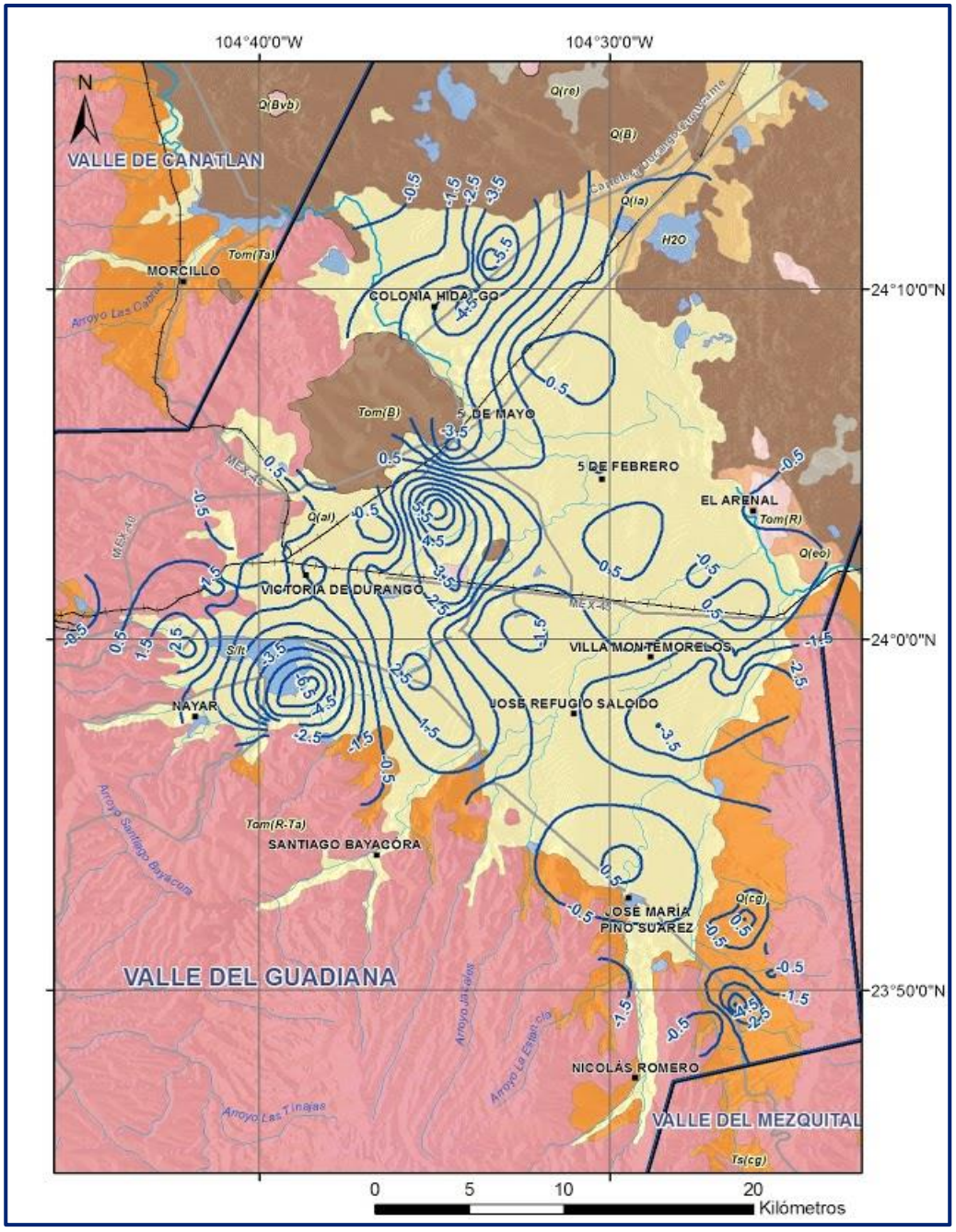



Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2012-2014)

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 7 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 240 a 480 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 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), las 7 muestras de agua se clasifican como $C_2S_1$, que representa contenido medio de sales y baja concentración de sodio intercambiable, apta para el uso agrícola.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, las que predominan son bicarbonatada sódica, reciente infiltración, y sulfatada-sódica que representa agua más evolucionada, que tuvo intercambio iónico con las rocas que conforman el medio geológico.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2014 se identificaron un total de 1,643 aprovechamientos, de los cuales 1342 son pozos, 286 norias, 10 tajos y 5 manantiales; del total de obras, 1,549 están activas y las restantes 94 inactivas.

De acuerdo con su clasificación por usos, de las 1,549 obras activas, 592 se utilizan en la agricultura, 416 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 162 para usos doméstico, 208 para uso pecuario, 66 para uso industrial, 75 para servicios y 30 para usos múltiples. El volumen de extracción asciende a **158.2 hm³ anuales**, de los cuales 58.3 $hm^3$ (36.9%) se destinan al uso agrícola, 86.2 $hm^3$ (54.5%) se utilizan para uso público-urbano, 8.7 $hm^3$ (5.5%) para uso industrial, 1.5 $hm^3$ (0.9%) para servicios y 3.5 $hm^3$ (2.2%) para otros usos múltiples. Adicionalmente, a través de **manantiales** se descarga un caudal de 25 lps, que representa un volumen anual de **0.8 hm³**, destinados a los usos doméstico-pecuario.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2012-2014, en una superficie de **562 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 riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

### 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:

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

Donde:

**Rv =** Recarga vertical
**Eh =** Entradas por flujo subterráneo horizontal
**Ri =** Recarga incidental
**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:

$$\mathbf{Rv = B + Sh + ETR + Dm – Ri – Eh \pm \Delta VS} \qquad \mathbf{(2)}$$

### 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:

$$Q = T * B * i$$

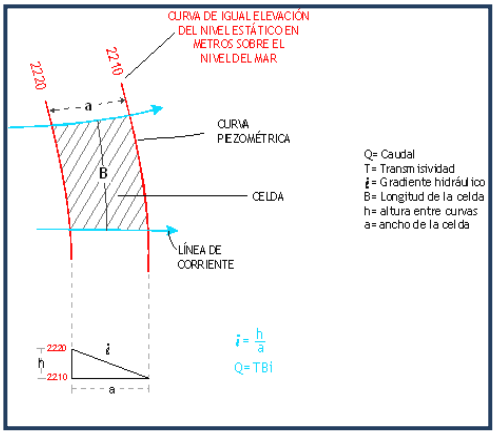
Donde:

**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 **63.3 $hm^3$/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) | T ($m^2/s$) | CAUDAL Q ($m^3/s$) | VOLUMEN ($hm^3$/año) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| E1 | 2425 | 510 | 2 | 0.0110 | 0.1046 | 3.3 |
| E2 | 6170 | 635 | 2 | 0.0110 | 0.2138 | 6.7 |
| E3 | 7290 | 540 | 2 | 0.0107 | 0.2889 | 9.1 |
| E4 | 4680 | 1135 | 2 | 0.0073 | 0.0602 | 1.9 |
| E5 | 5000 | 510 | 2 | 0.0073 | 0.1431 | 4.5 |
| E6 | 4845 | 440 | 2 | 0.0039 | 0.0859 | 2.7 |
| E7 | 5870 | 805 | 4 | 0.0039 | 0.1138 | 3.6 |
| E8 | 5850 | 785 | 4 | 0.0013 | 0.0388 | 1.2 |
| E9 | 1410 | 300 | 2 | 0.0034 | 0.0320 | 1.0 |
| E10 | 1055 | 540 | 4 | 0.0034 | 0.0266 | 0.8 |
| E11 | 1885 | 560 | 2 | 0.0182 | 0.1225 | 3.9 |
| E12 | 2815 | 565 | 2 | 0.0052 | 0.0518 | 1.6 |
| E13 | 7505 | 810 | 2 | 0.0003 | 0.0056 | 0.2 |
| E14 | 2585 | 710 | 2 | 0.0007 | 0.0051 | 0.2 |
| E15 | 2375 | 320 | 2 | 0.0235 | 0.3488 | 11.0 |
| E16 | 2370 | 430 | 2 | 0.0236 | 0.2601 | 8.2 |
| E17 | 4810 | 845 | 2 | 0.0093 | 0.1059 | 3.3 |
| | | | | | **TOTAL** | **63.3** |

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 Recarga incidental (Ri)

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 en la zona agrícola 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 184.3 $hm^3$, de los cuales 58.8 $hm^3$ corresponden a agua subterránea y 126.0 $hm^3$ de agua superficial, al aplicar el 10% de retornos de riego como recarga efectiva al acuífero, se obtiene un volumen promedio anual de 18.4 $hm^3$. **Rr = 18.4 $hm^3$anuales.**

Por otra parte, las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varían según la zona, para este caso se consideró un promedio de 20%, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano como recarga efectiva resulta un volumen de 17.2 $hm^3$. **Ri = 17.2 $hm^3$/año.**

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), salidas naturales 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 por bombeo asciende a **158.2 $hm^3$ 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, mostrada en la figura 5. Su valor estimado es de **3.7 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas 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) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 4485 | 1785 | 4 | 0.00224 | 0.0015 | 0.0151 | 0.5 |
| S2 | 2130 | 1080 | 2 | 0.00185 | 0.0015 | 0.0059 | 0.2 |
| S3 | 3915 | 1200 | 2 | 0.00167 | 0.0046 | 0.0300 | 0.9 |
| S4 | 3630 | 1275 | 2 | 0.00157 | 0.0046 | 0.0262 | 0.8 |
| S5 | 3475 | 1320 | 2 | 0.00152 | 0.0046 | 0.0242 | 0.8 |
| S6 | 2385 | 1305 | 2 | 0.00153 | 0.0046 | 0.0168 | 0.5 |
| | | | | | | TOTAL | 3.7 |

### 7.2.3. 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. 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 17.5 °C y 530.9 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 489.0 mm anuales, como se muestra a continuación:

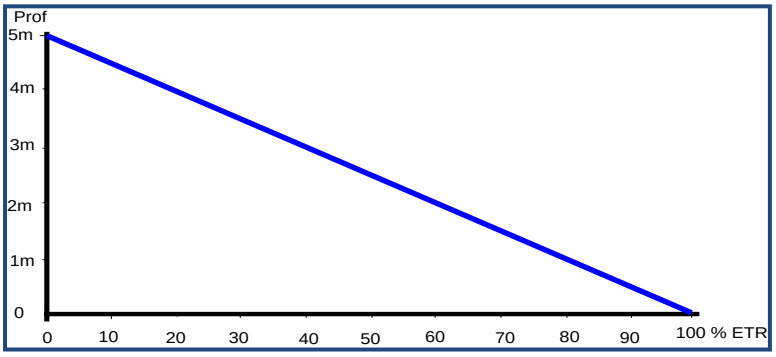
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

| | | | |
|---|---|---|---|
| T (°C) = | 17.5 | | |
| P(mm) = | 530.9 | $P^2$ = | 281854.81 |
| L = | 1005.46875 | $L^2$ = | 1010967.41 |
| | | | |
| ETR (mm) | 489.0 | | |

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.




De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 2.9 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2014)

| RANGOS DE PROFUNDIDAD (m) | PROFUNDIDAD MEDIA (m) | ÁREA ($km^2$) | LÁMINA ETR (m) | % ETR | VOLUMEN ETR ($hm^3$/año) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 a 1 | 0.5 | 1.7 | 0.4890 | 0.9 | 0.7 |
| 1 a 2 | 1.5 | 3.0 | 0.4890 | 0.7 | 1.0 |
| 2 a 3 | 2.5 | 2.4 | 0.4890 | 0.5 | 0.6 |
| 3 a 4 | 3.5 | 3.3 | 0.4890 | 0.3 | 0.5 |
| 4 a 5 | 4.5 | 2.8 | 0.4890 | 0.1 | 0.1 |
| | **TOTAL** | **13.2** | | | **2.9** |

### 7.2.4. Descarga por manantiales (Dm)

La descarga a través de los manantiales se estimó en 25 lps, que representa un volumen anual de 0.8 $hm^3$. **Dm = 0.8 $hm^3$ 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 2012-2014 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.1, 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 523 $km^2$, se obtuvo un abatimiento promedio de 1.2 m y un cambio de almacenamiento promedio anual de −674.4 hm3, que afectado por el rendimiento especifico de 0.1 resulta: ΔV(S) = −674.4 (0.1) = −67.4 $hm^3$. Por lo tanto, el promedio es **ΔV(S) = - 33.7 $hm^3$ 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:

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm - Ri - Eh \pm \Delta VS$$
$$Rv = 158.2 + 3.7 + 2.9 + 0.8 - 35.6 - 63.2 - 33.7$$
$$Rv = 33.1\ hm^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = Rv + Eh + Ri$$
$$R = 33.1 + 63.2 + 35.6$$
$$R = 131.9\ hm^3 \text{ anuales}$$

## 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 **131.9 hm³/año**, de los cuales 96.5 $hm^3$ son recarga natural y 35.4 $hm^3$ 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 del Guadiana, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **7.4 hm³ anuales**, de los cuales 3.7 $hm^3$ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero vecino Vicente Guerrero-Poanas, 2.9 $hm^3$ por evapotranspiración y 0.8 $hm^3$ de descarga de los manantiales.

**DNC = 7.4 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 **145,324,352 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.

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$
$$\mathbf{DMA = 131.9 - 7.4 - 145.324352}$$
$$\mathbf{DMA = -20.824352\ hm^3/año}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **20,824,352 $m^3$ 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.