



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MADERO-VICTORIA (1005),
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.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	20
4.3 Geología del subsuelo.....	22
5. HIDROGEOLOGÍA.....	23
5.1 Tipo de acuífero.....	23
5.2 Parámetros hidráulicos.....	23
5.3 Piezometría.....	24
5.4 Comportamiento hidráulico.....	24
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	24
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	25
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	26
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	27
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	28
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	28
7.1 Entradas.....	29
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	29
7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh).....	30
7.1.3 Retornos de riego (Rr).....	31
7.2 Salidas.....	32
7.2.1 Bombeo (B).....	32
7.2.2 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh).....	32
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	32
7.2.4 Descarga por manantiales (Dm).....	34
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	34
8. DISPONIBILIDAD	35
8.1 Recarga total media anual (R).....	35
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	36
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	36
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	36
9. BIBLIOGRAFÍA	38

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 Madero-Victoria, definido con la clave 1005 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Durango, entre las coordenadas 24°09' y 24°36' de latitud norte y 103°50' y 104°31' de longitud oeste, abarcando una superficie de 1,706 km² (figura 1).

Limita al norte con los acuíferos San Juan del Río y Peñón Blanco, al sur con el acuífero Vicente Guerrero-Poanas, al este con el acuífero Cuauhtémoc y al oeste con el acuífero Valle de Guadiana, todos ellos pertenecientes al estado de Durango.

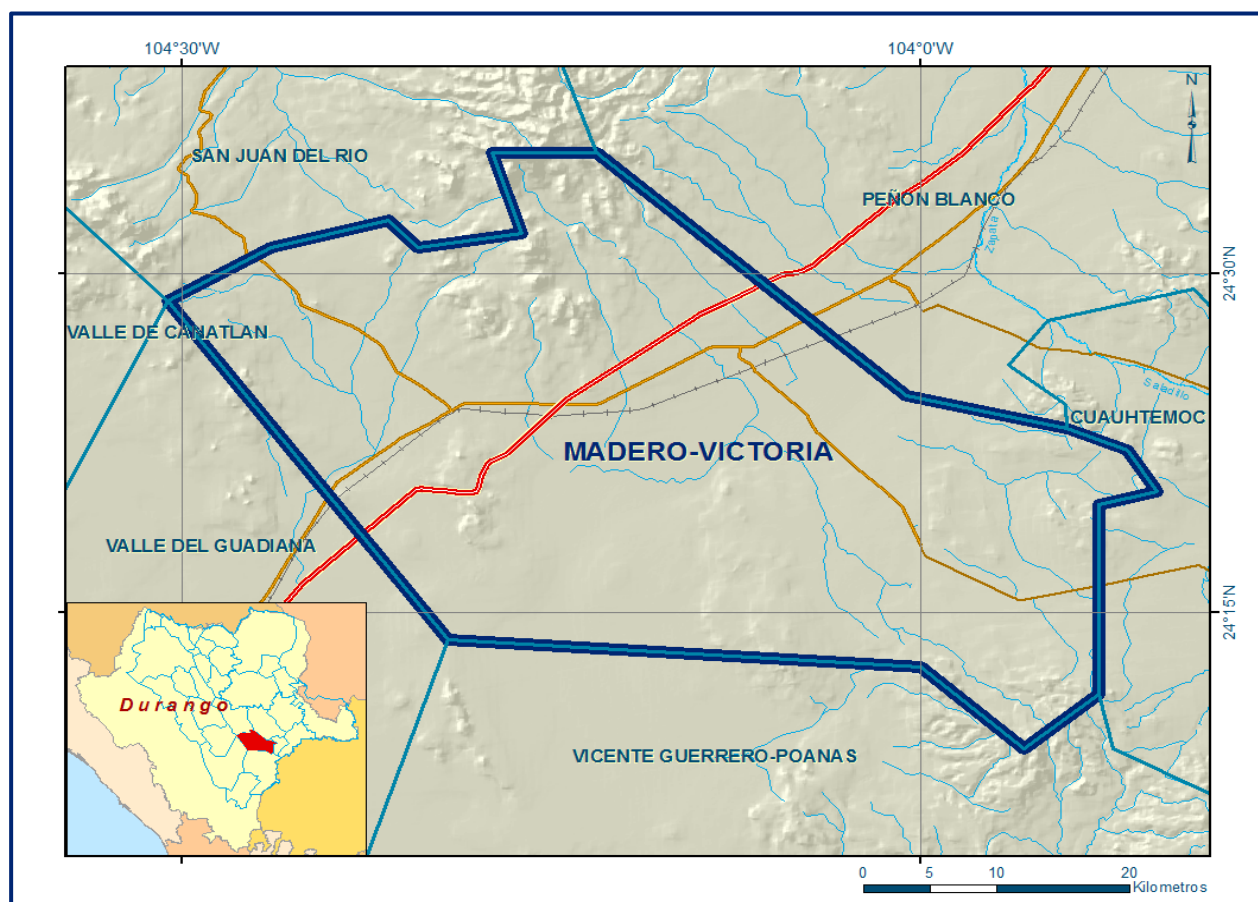


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero se localiza parcialmente dentro de los municipios Guadalupe Victoria, Cuencamé, Poanas, Durango, Canatlán 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 del acuífero

ACUIFERO 1005 MADERO-VICTORIA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	55	48.0	24	9	0.0
2	104	0	0.0	24	12	36.0
3	104	19	12.0	24	13	48.0
4	104	30	36.0	24	28	48.0
5	104	26	24.0	24	31	12.0
6	104	21	36.0	24	32	24.0
7	104	20	24.0	24	31	12.0
8	104	16	12.0	24	31	48.0
9	104	17	24.0	24	35	24.0
10	104	13	12.0	24	35	24.0
11	104	0	36.0	24	24	36.0
12	103	54	4.0	24	23	10.4
13	103	51	36.0	24	22	12.0
14	103	50	24.0	24	20	24.0
15	103	52	48.0	24	19	48.0
16	103	52	48.0	24	11	24.0
1	103	55	48.0	24	9	0.0

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero 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. En su superficie completa 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 de las aguas nacionales del subsuelo en los siete 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 del agua subterránea es el agrícola. Dentro de los límites del acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguno. Los usuarios se encuentran organizados a través del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero 1005 Madero-Victoria, A.C., instalado el 14 de enero de 2005.

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 conocer 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 la Ley de Aguas Nacionales, para establecer la medida regulatoria que proceda.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizarán 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 Madero-Victoria se ubica en la transición de 2 Provincias Fisiográficas. La porción occidental del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica III “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; la porción oriental del acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica IX “Mesa del Centro”, que se caracteriza por presentar amplias llanuras, con pequeñas sierras aisladas y lomeríos.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la zona oriental del acuífero se localiza en la Provincia Mesa del Centro, Subprovincia Sierras y Llanuras del Norte, y la porción occidental en la Provincia Sierra madre Occidental, Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango.

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 Mesa Central de México fue reconocida como provincia fisiográfica por Raisz (1959), quien la definió como: *“una cuenca rodeada por montañas más elevadas. Más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras (localizada al norte). En lugar de sierras elongadas, ésta tiene áreas poco elevadas, principalmente disectando rocas volcánicas antiguas”*. Se caracteriza por ser una región semidesértica elevada, en su mayor parte plana, ubicada en la región central de México, que presentan amplias llanuras interrumpidas por algunas sierras. Abarca parte de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Aguascalientes y Guanajuato. La Subprovincia Sierras y Llanuras del Norte se caracteriza por presentar extensas llanuras altas, de 2,000 a 2,200 msnm de elevación, limitadas por sierras alargadas y angostas, que en general están orientadas en dirección NW-SE, así como zonas de lomeríos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), toda la superficie del acuífero presenta climas del tipo seco, debido a las condiciones de precipitación de la zona, presentándose dos variaciones: BS1kw y BS0kw. Más del 95 % de la superficie del acuífero presenta un clima del tipo BS1kw, semiárido templado con verano cálido, que presenta un cociente de precipitación/temperatura menor a 22.9.

Se caracteriza por presentar precipitaciones medias anuales entre los 400 y los 500 mm, régimen de lluvias en verano con porcentaje de lluvia invernal inferior al 20% del promedio anual, en algunos casos las precipitaciones mínimas son menores a 10 mm y temperaturas extremosas que registran oscilaciones entre 7° y 14°C. La porción noroeste del acuífero, desde Guadalupe Victoria hasta Álvaro Obregón (menos del 5% de la superficie total del acuífero), presenta un clima del tipo BS0kw, clima árido templado con verano cálido, el cual es muy similar al clima BS1kw que presenta la mayor parte del acuífero, pero a diferencia de que éste es un poco más seco.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 2 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Francisco I. Madero y Guadalupe Victoria, cuyo registro comprende los periodos 1932-2006 y 1963-2008, respectivamente.

De acuerdo con estos datos y utilizando el método de isoyetas e isotermas, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **460 mm y 16.6° C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,283 mm** anuales.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región.

3.3 Hidrografía

El área del acuífero Madero-Victoria pertenece casi en su totalidad a la Región Hidrológica 11 Presidio-San Pedro, Subregión Hidrológica San Pedro, Rosa Morada y Acaponeta, cuenca Río San Pedro, que comprende los estados de Durango, Nayarit y Zacatecas; una pequeña porción de su extremo nororiental, donde se ubican las localidades Pánuco de Coronado, Santa Catalina de Siena y Francisco Javier Mina, pertenecen a la Región Hidrológica 36 Nazas-Aguanaval.

En el territorio que cubre el acuífero no existe ninguna corriente superficial perenne, solo corrientes intermitentes, arroyos y algunas pequeñas lagunas. Las principales corrientes superficiales que se localizan dentro del área de estudio son arroyos, los cuales en su mayoría nacen en las sierras Sabinillas y Gamón, para finalmente desembocar en algunas de las lagunas del acuífero o simplemente desaparecer por infiltración en los valles; los arroyos de mayor importancia son El Durazno, Canalizo, Los Mimbres, Colorado, La Providencia, La Coyota y El Águila.

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.

La Mesa Central está definida como una cuenca rodeada por montañas más elevadas, más altas y más planas que la provincia Cuencas y Sierras.

En lugar de sierras elongadas, ésta tiene áreas poco elevadas, principalmente disectando las rocas volcánicas antiguas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2,000 y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m.

La zona donde se localiza el acuífero muestra un estado de erosión avanzado con grandes cuencas continentales endorreicas rellenas de sedimentos aluviales y lacustres. Los elementos fisiográficos que caracterizan el relieve de la región que ocupa el acuífero son planicies, mesetas y volcanes, malpaíses y sierras.

Las planicies se desarrollan en las porciones central y sureste del acuífero, con alturas promedio de 1,900 msnm, en las que se presentan algunos lomeríos al norte y al sur, constituidos por materiales clásticos cenozoicos y recientes.

Las mesetas y volcanes se localizan en la porción sureste y entre ellas destaca Santa Bárbara, constituida por materiales piroclásticos, y otra región de mayor altura que se ubica al noroeste, constituida en su parte inferior por piroclásticos y en la superior por basaltos. Los malpaíses se localizan en las porciones sur y oeste del acuífero y se caracterizan por presentar grandes extensiones, poco accidentadas, formadas por derrames basálticos.

Así mismo, es posible identificar un gran número de aparatos volcánicos diseminados, de altura variable con diferentes grados de erosión. Por último, las sierras se localizan en los extremos norte y suroriental del acuífero.

La elevación topográfica varía de 2,000 en los valles a 2,500 msnm en los cerros y mesas que delimitan el acuífero

4. GEOLOGÍA

En el área cubierta por el acuífero afloran rocas de diferente composición y edad. Las rocas más antiguas que afloran corresponden a la Formación Mezcalera, representada por dos unidades. La primera corresponde a una secuencia calcárea-pelítica y la segunda está conformada por la secuencia pelítica-calcárea (Figura 2).

Se trata de una potente sección de calizas que varían a partir de su base, de calcarenitas con intercalaciones de estratos de areniscas, calizas de estratificación mediana con lentes y capas de pedernal, finalizando en su porción superior una alternancia de caliza y lutitas.

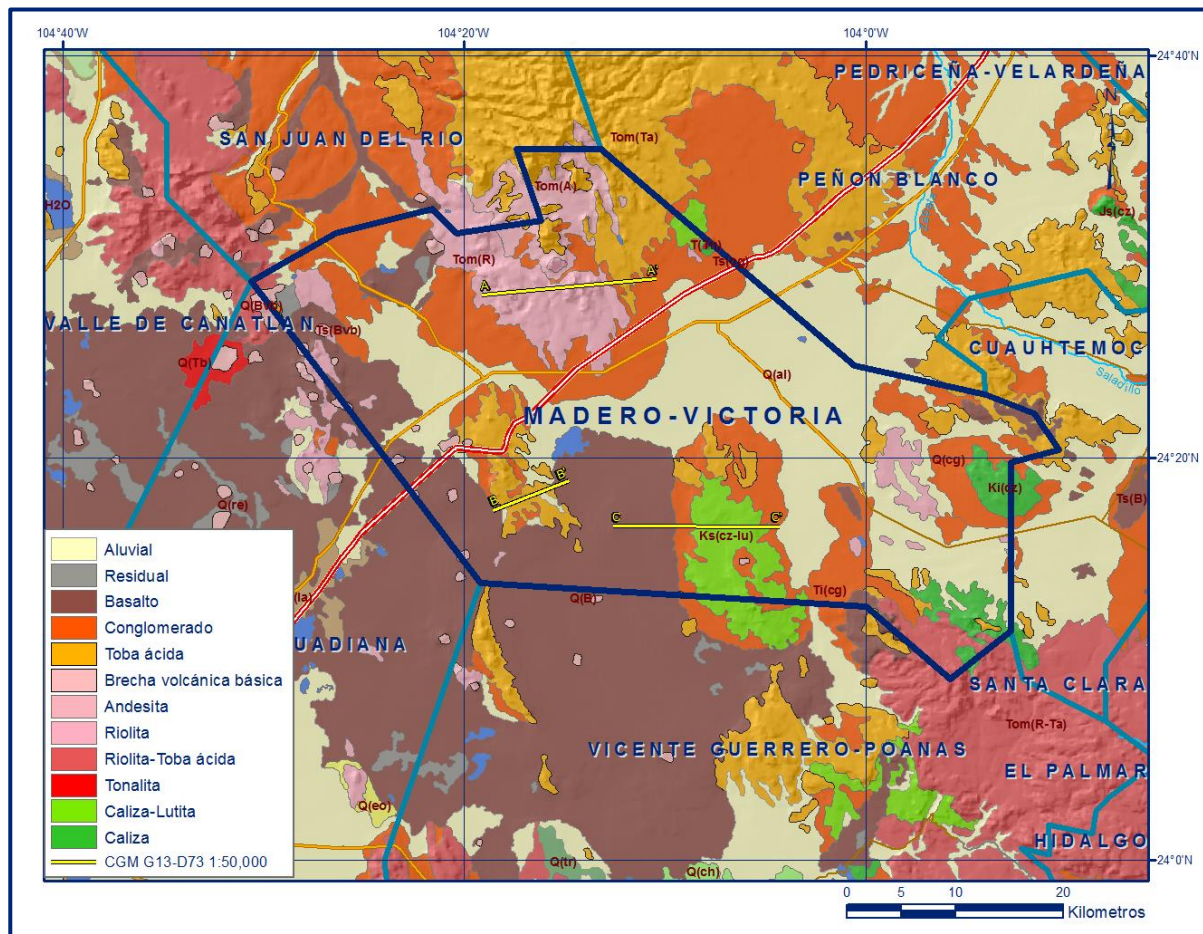


Figura 2. Geología general de acuífero

De acuerdo con la posición estratigráfica y características litológicas de estas rocas, es posible correlacionarlas con las formaciones Aurora y Cuesta de Cura, del Cretácico Medio, e Indidura del Cretácico Superior. Estas unidades no afloran pero se ha identificado su presencia en el subsuelo a través de los pozos. Generalmente, se encuentran cubiertas por una delgada capa de materiales del Reciente, lo que dificulta apreciar los contactos entre ellas.

Le sobreyace discordantemente, una secuencia de derrames y brechas andesíticas, cuya edad es del Eoceno, de acuerdo con dataciones radiométricas, que permiten asociarlas a la Secuencia Volcánica Inferior; esta unidad está afectada por diques de composición andesítica. Sobreyaciendo discordantemente a esta unidad, se presenta la secuencia del Supergrupo Volcánico Superior, representada por riolitas e ignimbritas con intercalaciones de tobas riolíticas y cenizas tipo lapilli.

La edad de estas rocas, obtenida por dataciones radiométricas en otras localidades, permiten asignarle una edad que corresponde al Oligoceno.

Esta unidad está parcialmente afectada por diques de composición andesítica.

Afectando a la Secuencia Volcánica Superior, se presentan domos exógenos de composición riolítica cuya datación radiométrica se asigna al Oligoceno. Cubriendo discordantemente a las unidades anteriores, se presentan basaltos y andesitas, probablemente correlacionables con la Formación Metates, con edad radiométrica de 11.7 a 12.6 Ma, que la sitúan en el Mioceno Superior.

En forma discordante, sobreyace un conglomerado polimíctico, constituido por fragmentos de rocas ígneas y sedimentarias, que se correlaciona con la Formación Los Llanos. Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad correspondiente al Mioceno-Plioceno. Cubriendo discordantemente a las unidades anteriores se presenta la Formación Guadiana, representada por derrames de basalto, que por su similitud litológica y posición estratigráfica, se correlacionan con el campo basáltico de Durango, cuya edad se le ha asignado al Pleistoceno. Finalmente, en los cauces de los arroyos principales y las grandes planicies de la Fosa Guadalupe Victoria, existen depósitos aluviales, conformados por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario (Holoceno) (Carta Geológica Minera G13-D73 “Guadalupe Victoria”, escala 1:50,000, SGM, 2001).

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende rocas volcánicas y sedimentarias cuyas edades varían del Cretácico Superior al Cuaternario (figura 2).

La sucesión 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, cuyos afloramientos principales se ubican en las porciones suroriental y oriental del acuífero. Litológicamente está constituida por una secuencia rítmica de areniscas de grano fino y lutitas intercaladas con horizontes gruesos de calizas y limolita.

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

Formación Aurora

El nombre fue propuesto por Burrows (1910) para aquellas rocas que afloran en la porción noreste del estado de Chihuahua, donde están constituidas por capas gruesas de calizas fosilíferas, que presentan abundantes nódulos de pedernal. Está constituida por calizas de estratificación media a gruesa con diversos desarrollos arrecifales y algunos horizontes de calcarenitas. Presenta una coloración de tonalidad gris a oscura, escasos nódulos de pedernal y hematita hacia la cima, con fracturamiento general que varía de moderado a intenso, estructuralmente forma pliegues anticlinales cuyo eje se orienta noroeste-sureste y echados suaves más o menos uniformes.

Está expuesta en varias localidades; en algunos sitios se presenta en afloramientos aislados en forma de lomeríos bajos cubiertos por rocas ígneas, mientras que en otros muestra estructuras anticlinales bien definidas: Anticlinal La Virgen-La Roca. Aflora en un macizo montañoso de poca altura ubicado al sureste del acuífero, ocupando la totalidad del área conocida como La Sierrita; otra exposición de se presenta a unos 6 km hacia el norte, cuyas rocas han sido afectadas por un tronco de riolita extrusiva, provocando la generación de minerales de contacto metasomático, ricos en plomo y zinc principalmente, este lugar se conoce como “Las Minas”.

También se presenta en la Mina Santo Niño, ubicada a 9 km al norte de Guadalupe Victoria. Su mejor exposición se localiza en el cerro de Santiago, ubicado al oeste de La Virgen. Por su posición estratigráfica y su contenido fosilífero, es posible asignarle una edad correspondiente al Albiano-Cenomaniano. Su espesor estimado es de 300 m.

Formación Cuesta del Cura

Fue definida formalmente por Imlay (1936) en su localidad tipo llamada Cuesta del Cura, ubicada a 7 km al poniente de Parras, Coahuila.

La describe como una sección de 65 m de potencia, constituida por capas delgadas de calizas de color gris a negro, onduladas y con numerosos nódulos de pedernal, sobreyaciendo concordantemente a las calizas de la Formación Aurora y, de la misma manera, subyaciendo a la Formación Indidura.

En la región de La Parrilla, San Martín y Chalchihuites se localizan importantes obras mineras en esta región. Según Mayer (1967), las calizas Cuesta del Cura pueden estar interdigitalizadas con la Formación Aurora, por lo cual se le ha asignado una edad que comprende de Albiano Tardío al Turoniano Temprano.

Aflora en el anticlinal Los Palotes y en la Sierra Yerbaniz, donde está constituida por calizas de color gris oscuro a negro, densa, con lentes de pedernal negro, dispuestas en estratos de espesor mediano a grueso, con presencia de ondulaciones, típicas de esta formación. La formación es característica de cuenca y tan solo presenta alguna variación por la presencia de calcarenitas y calcilutitas que se relacionan con la presencia de la plataforma cercana. Su espesor es del orden de los 200 m.

Formación Indidura

Fue nombrada por Kelly (1936) en la región de Delicias, Coahuila, donde sobreyace a la Formación Aurora y consiste de 30 m de lutitas, interestratificadas con capas delgadas de calizas.

En la zona de estudio sobreyace concordantemente a las calizas Cuesta del Cura y está constituida por una alternancia de rocas calcáreas y lutitas, que presentan una coloración gris claro que intertemperiza a café rojizo. Sus mejores exposiciones se encuentran en la margen izquierda del Río Poanas, en las cercanías del poblado Santa Atenógenes, sobre la carretera que une Narciso Mendoza con La Ochoa, y al este del Rancho Los Hernández. Su litología sugiere las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide en ambientes litorales. De acuerdo con su posición estratigráfica, se le asigna una edad que corresponde al Turoniano.

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. Aflora en varias localidades, las principales se localizan, en la porción norte, en el flanco SW-SE de la Sierra de Yerbaniz, donde forma lomeríos bajos; al sureste en el flanco oriental del Anticlinal La Virgen-la Roca, donde está ampliamente expuesta, y al sur de este anticlinal, en el área del pequeño poblado llamado 10 de Abril, en donde aflora en forma de lomeríos alargados.

Debido a su posición estratigráfica y su origen, el cual se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia 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.

Supergrupo Volcánico Inferior

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 a Mezquital, Dgo. (Keizer, 1974) y sobre la carretera a Mazatlán por McDowell y Clabaugh (1976); los primeros autores la mencionan constituida por riolitas, toba andesítica y andesitas con un espesor de 800 m; en Topia, Dgo. Lemish (en Clark y otros, 1977), reporta un espesor de 1,400 m en una alternancia de andesitas y tobas en la Sierra de Registro y Sierra Colorada, al suroeste de la Cd. de Durango.

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

Generalmente esta secuencia tiene la característica especial de presentarse en forma pseudoestratos de 50 a 1.5 m de espesor 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 Tejámén, Alamito, Coneto de Comonfort y San Lucas de Ocampo. La andesita fue datada por el método de K-Ar en la localidad de San Lucas de Ocampo reportando una edad de 38.8 m.a. (Damon, 1975). Se tiene otra datación en la carretera Durango-Mazatlán que arrojó una edad de 52 m.a. (McDowell y Clabaugh, 1976); por lo que la andesita queda ubicada en el Paleoceno - Eoceno Temprano a Tardío.

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.

La Sierra Madre Occidental es una gran región con elevaciones y depresiones topográficas que forman la margen occidental del altiplano central mexicano. En la región de Durango está profundamente disectada por ríos que fluyen hacia el este y que descienden rápidamente al nivel del mar.

La parte superior está compuesta por rocas volcánicas del Cenozoico Medio, donde se pueden apreciar ignimbritas riolíticas espectacularmente expuestas.

Ésta es probablemente la secuencia de ignimbritas continua más grande del mundo (McDowell y Clabaugh, 1979; Swanson y McDowell, 1984), distribuida en un cinturón con orientación sureste con aproximadamente 200-500 km ancho y al menos 1,200 km de largo, extendiéndose desde la frontera de México con Estados Unidos, hasta su intersección con la provincia de la Faja Volcánica Trans-Mexicana.

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

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

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

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

Haciendo un estudio comparativo con el campo volcánico de San Juan, McDowell y Clabaugh (1979) estimaron que para producir los más de 300,000 km³ de rocas piroclásticas que forman la Sierra Madre Occidental (300,000 km² de área cubierta por este paquete de ignimbritas multiplicado por un espesor promedio de 1 km) deberían existir de 200 a 400 calderas con un diámetro promedio de 30 km; sin embargo, sólo se han reportado alrededor de 15 calderas (o complejos de calderas) en la Sierra Madre Occidental, de las cuales solo unas cuantas han sido moderadamente estudiadas (Swanson y McDowell, 1984; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003).

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

Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández (2003) y Aguirre-Díaz et al. (2005), Aguirre-Díaz et al. (2007, 2008) proponen la existencia de cámaras magmáticas alargadas de dimensiones batolíticas que formaron calderas alargadas dentro de los grabens, llamando a estas estructuras “graben-caldera”.

Derrames Riolíticos

Se diferencian litológicamente asociaciones y alternancia de riolitas porfídicas, corrientes de flujo, tobas soldadas, tobas de caída libre, variando su composición de riolita a riodacita en zonas de corrientes de flujo y hacia la transición a rocas andesíticas.

Domos

Esta unidad está representada por domos de composición riolítica con minerales de cuarzo, feldespatos y vidrio los cuales fueron descritas por McDowell y Keizer (1977). Las estructuras tienen un espesor que varía de 50 a 200 m. Debido a que se encuentran cortando a las rocas volcánicas, se les asigna una edad correspondiente al Oligoceno.

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 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.

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.

Formación Santa Inés

El término formacional de esta unidad fue propuesto por Pantoja (1963) para designar a las rocas conglomeráticas de origen continental que afloran en las cercanías de San Pedro El Gallo, Dgo. En la región se encuentran distribuidas en la mayor parte de las sierras formadas por rocas volcánicas cenozoicas (series volcánicas inferior y superior).

Está constituida por conglomerados de rocas volcánicas, que en su contacto con las rocas subyacentes presenta capas arenosas de color rojizo, así como limos de color blanquecino, secuencia que paulatinamente cambia a conglomerados hacia la cima. Intercalaciones de derrames basálticos se observaron en las inmediaciones de San José de la Unión. Por la similitud litológica y relación estratigráfica, estos depósitos se correlacionaron con la Formación Los Llanos, asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

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.

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 Constanza.

Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color oscuro en superficie fresca que intemperiza a café oscuro, 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 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 transportadas por las corrientes de los ríos y arroyos hasta las regiones topográficamente más bajas, formando extensas planicies aluviales y lacustres.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente la región está afectada por un patrón de fallas normales de rumbo NW-SE, que conforman una serie de fosas tectónicas escalonadas, las cuales son desplazadas ocasionalmente por fallas laterales. El fallamiento normal NW-SE se infiere que pudo haber sido el conducto para el emplazamiento del pórfido traquítico, domos exógenos, aparatos volcánicos y diques.

Con base en lo anterior, se definieron de poniente a oriente, los pilares Zaragoza, Guadalajara, Los Cuatillos y La Fosa Guadalupe Victoria (Carta Geológica-Minera G13-D73 Guadalupe Victoria. Escala 1:50,000. SGM, 2009). Esta región cubierta por la superficie del acuífero Madero-Victoria, presenta estructuras de dominio dúctil-frágil en las secuencias plegadas de rocas sedimentarias y posteriormente del dominio frágil.

Las fallas normales conforman un sistema predominante de rumbo NW-SE y en menor proporción NE-SW; las fallas laterales detectadas son tanto dextrales como sinestrales y muestran dos direcciones: NE-SW y NW-SE.

La mayor parte de las estructuras que conforman el marco geológico-estructural de la región donde se ubica el acuífero Madero-Victoria han sido generadas mediante los mecanismos que dieron origen a la Sierra Madre Occidental.

Sin embargo, las rocas generadas anteriormente a esta sierra muestran características propias que las hacen diferentes de las estructuras ocasionadas por los eventos magmáticos del Cenozoico: las estructuras circulares corresponden a las calderas de Chupaderos y Mezquital, las cuales se desarrollan al poniente y sur del área de estudio, respectivamente, están relacionadas con los eventos magmáticos del Supergrupo Volcánico Superior.

De esta manera, es claro que se presentan dos tipos de deformaciones independientes entre sí, una que corresponde a estructuras desarrolladas sobre rocas cretácicas y la otra que afecta a la carpeta volcánica.

La primera de estas deformaciones se asocia con los efectos compresivos generados por la Orogenia Laramide, la cual está representada por abundantes estructuras anticlinales y sinclinales con una vergencia al NE, así como fallas inversas en los flancos orientales de las estructuras, que se presentan en las unidades de edad cretácica, en un ambiente tectónico desarrollado en zonas adyacentes a un arco volcánico ubicado al occidente del Mar Mexicano (Secuencia Mezcalera o Parral. Eguluz, 1984).

En lo que respecta a la segunda fase de deformación, está controlada por efectos tensionales cenozoicos que ocurrieron en la Sierra Madre Occidental.

Los estudios realizados en la región describen dos grupos principales, el primero con trazas en dirección NW-SE y un segundo, que es subordinado, se presenta cortando al anterior y tiene una dirección NNE. Estas estructuras corresponden con fallas normales a las cuales Waitt (1970) y Wahl (1976), les determinaron bloques caídos hacia el oriente.

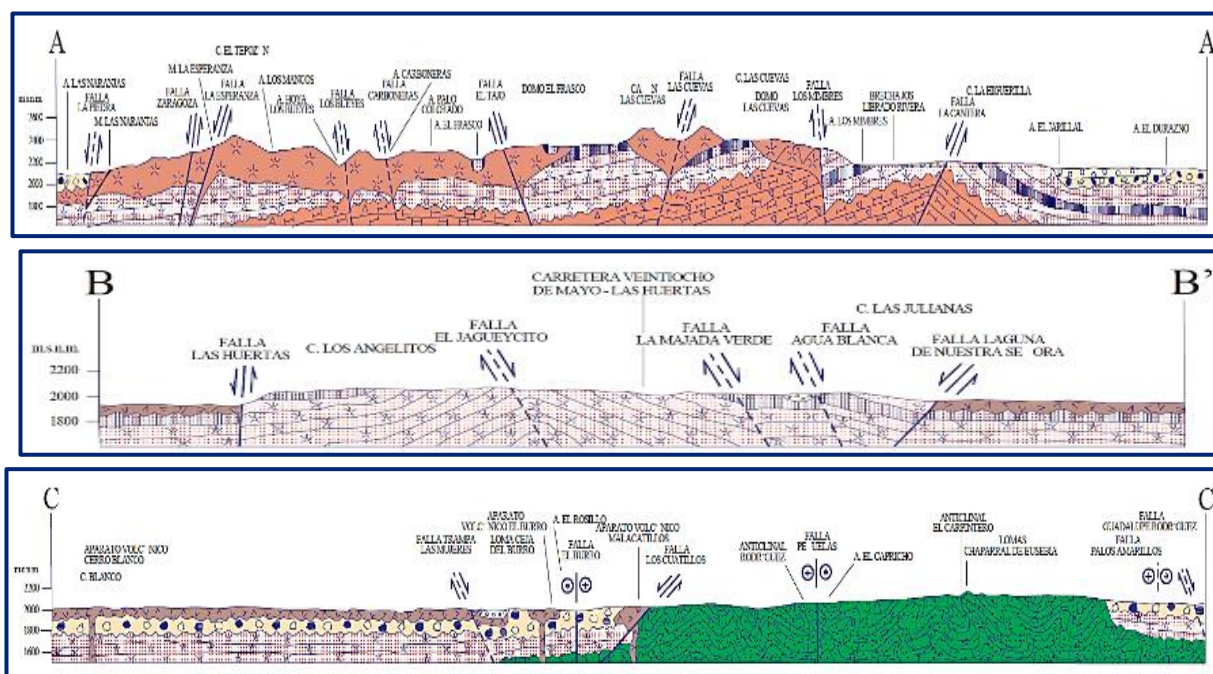
Las estructuras principales corresponden con lineamientos que se extienden desde Vicente Guerrero hasta la comunidad de Orión; también se observan otras estructuras como fallas normales que forman un horts, asociadas a cuerpos intrusivos.

Otros lineamientos son perpendiculares a los principales y están asociados a zonas de mineralización y manifestaciones, emplazadas en pliegues anticlinales, sinclinales, cabalgaduras y fallas, que permiten definir la dirección preferencial de los esfuerzos con un rumbo al noreste, asociados a la Orogenia Laramide.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, geofísica e hidrogeológica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y de pie de monte, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes y los 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.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que predominan basaltos, tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, 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 están sobreyacidas por lutitas y limolitas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-D17 "Guadalupe Victoria" Escala 1:50.000 (SGM, 2009)

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 de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por 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. Su existencia y potencial se ha comprobado en acuíferos vecinos que explotan esta unidad.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, 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 de transmisividad varían entre 0.05×10^{-3} y $5.07 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ con un valor promedio de $1.12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; los valores de conductividad varían de 1.64×10^{-6} y $9.91 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.1 a 8.6 m/d), con un valor promedio de $2.08 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (1.8 m/d).

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 0.02.**

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 2010 y 2014,

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 variaban de 5 a 90 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles.

Los niveles estáticos más someros, de 5 a 15 m, se presentan en la porción suroriental, en las inmediaciones del poblado Dos de Abril y al noreste, hacia la localidad Flor de Mayo, aumentando gradualmente conforme se asciende topográficamente.

Los más profundos, de 70 a 90 m, se registran en la porción central, en las inmediaciones de Francisco I. Madero, y en al noreste del acuífero, entre Juan Aldama y Guadalupe Victoria.

En la porción central las profundidades varían de 30 a 50 m (figura 4).

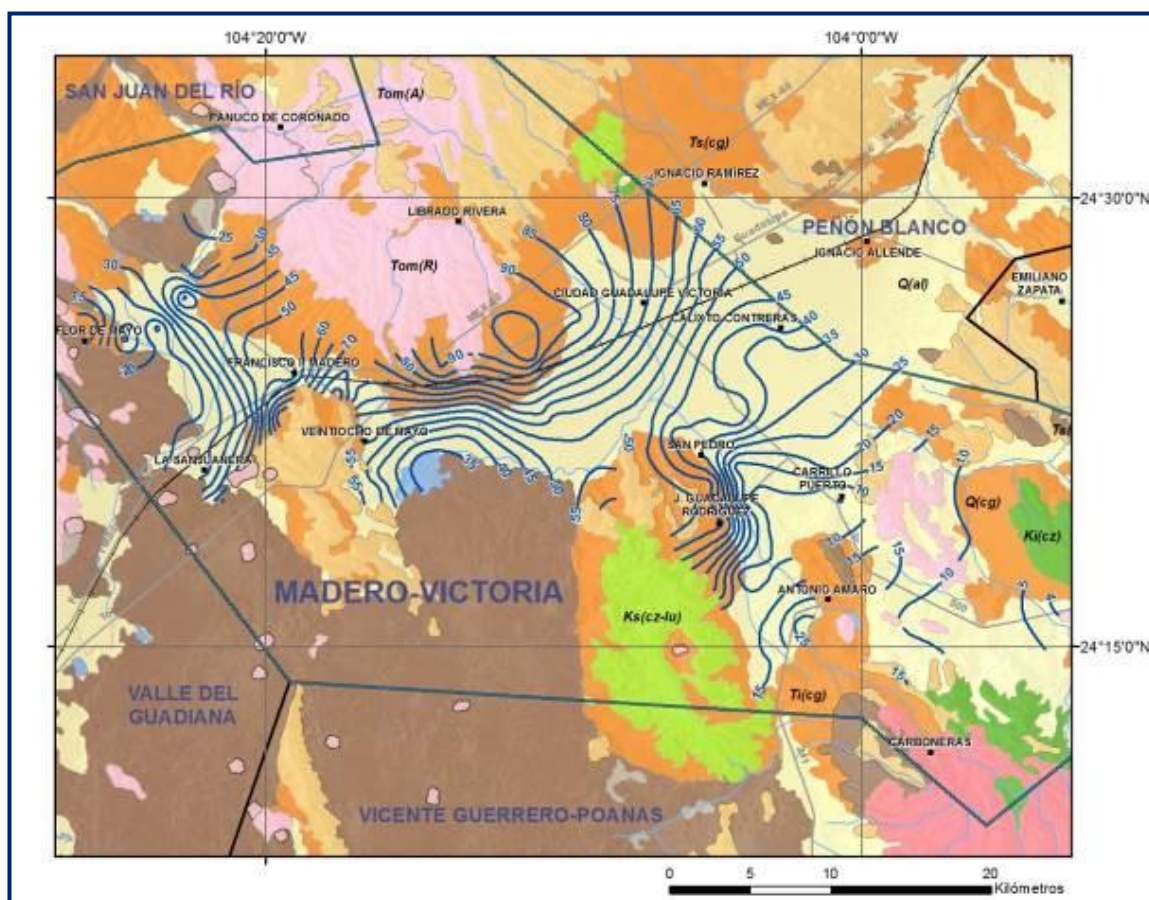


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2014)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2014 registró valores de carga hidráulica que varían de 2180 a 1870 msnm, que se incrementan de la porción occidental y central del acuífero hacia los flancos de las sierras que lo delimitan, mostrando una red de flujo subterráneo con dirección preferencial este-oeste, con alimentaciones de los flancos norte y sur, concéntrica en los conos de abatimientos generados en la zona de mayor explotación que se localiza en la región central. En la región occidental, donde se ubica el valle de Francisco I. Madero, la dirección preferencial del flujo subterráneo es norte-sur.

Las menores elevaciones, de 1870 a 1900 msnm, se registraron en la región suroccidental del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Veinticinco de Mayo y La San Juanera, y los mayores, de 2100 a 2180 msnm, en la porción suroriental, en las inmediaciones del poblado Dos de Abril y hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero en esta región (figura 5).

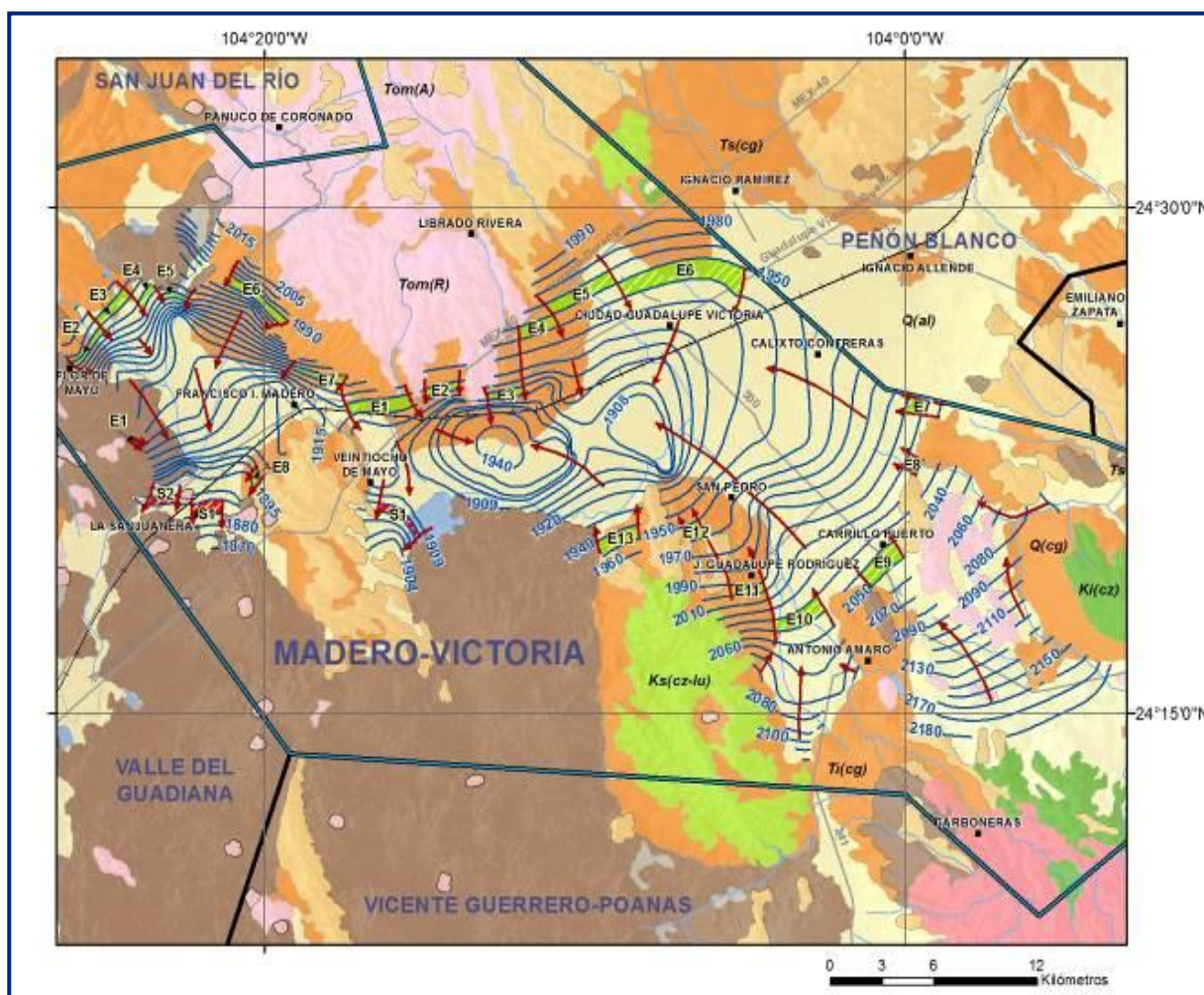


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2014)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2014, registra abatimientos de 0.5 a 5.0 m, con valores puntuales de hasta 7.5 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.1 a 1.2 m, con un promedio anual de 0.5 m. La zona del valle donde se encuentra la principal zona de explotación presenta abatimientos de 3 a 5 m, es decir un promedio de 1.0 m anuales. En el valle de Francisco I. Madero los abatimientos varían de 0.5 a 4.5, con promedio anual 0.5 m en la mayor parte de su superficie. Por otra parte, en el valle de Guadalupe Victoria, donde se localiza la zona de explotación intensiva, los abatimientos varían de 0.5 a 8.0, los mayores se registraron en las inmediaciones del poblado José María Pino Suárez, disminuyendo hacia el valle de Francisco I. Madero, hasta desaparecer en la cercanía del Ejido Veintiocho de Mayo (figura 6).

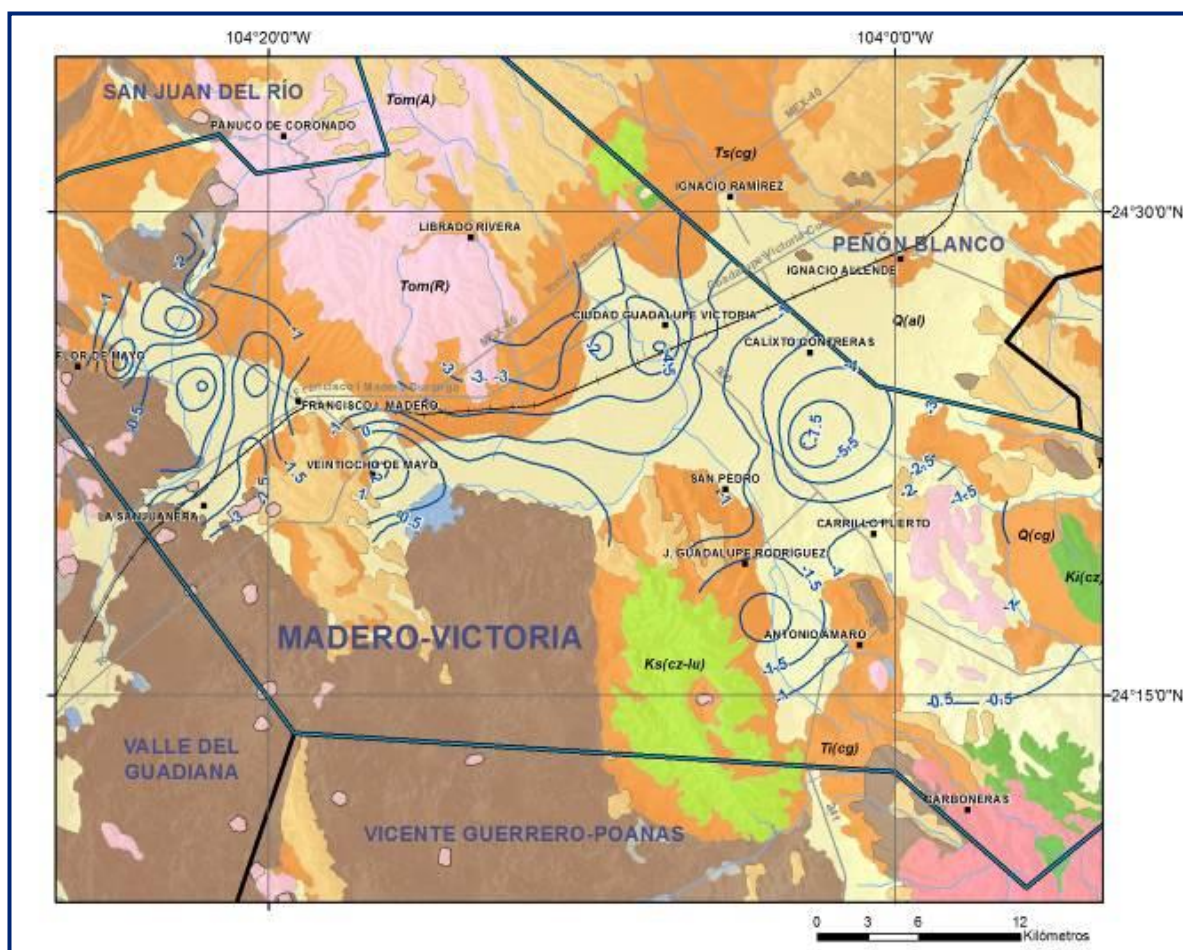


Figura 7. Evolución de nivel estático en m (2010-2014)

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. Adicionalmente, se cuenta con la información de los análisis de 7 muestras recolectadas en 2010. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, 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 181 a 340 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido 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. Con respecto a las familias del agua por ion dominante, las que predominan son bicarbonatada- sódica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas, y sulfatada-sódica,

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el total de las 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.

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 2010, complementado con el análisis realizado en 2014, se registraron un total de 648 aprovechamientos, 557 pozos, 87 norias, 2 manantiales y 2 tajos, del total de obras, 579 están activas y 69 inactivas. De acuerdo con su clasificación por usos, del total de las obras, 387 se utilizan en la agricultura, 82 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 13 para usos doméstico, 113 para uso pecuario, 3 para uso industrial, 2 para servicios y 48 para usos múltiples.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **28.7 hm³ anuales**, de los cuales 22.9 hm³ (79.8%) se destinan al uso agrícola, 4.4 hm³ (15.3%) so para uso público-urbano, y 1.4 hm³ (4.9%) para uso doméstico-pecuario y múltiple.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2014 en una superficie de **660 km²**, que corresponde a la zona en la que 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 como sigue:

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

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

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

7.1 Entradas

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

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

Para este caso, debido a que el volumen 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 el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) tiende a ser nulo y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

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 por manantiales

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

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

$$R_v = B + Sh + ETR + Dm - R_r - E_h \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (E_h)

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

$$Q = B * i * T$$

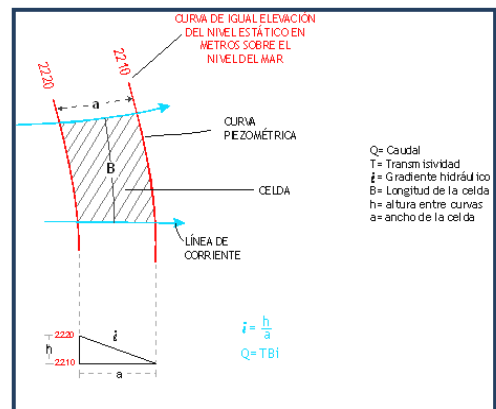
Donde:

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 **4.8 hm³/año**, como se observa en la tabla 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.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo 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	445	395	5	0.01266	0.00039	0.0022	0.1
E2	2490	360	5	0.01389	0.00047	0.0163	0.5
E3	2355	515	5	0.00971	0.00047	0.0107	0.3
E4	1405	505	5	0.00990	0.00047	0.0065	0.2
E5	1420	270	5	0.01852	0.00047	0.0124	0.4
E6	3825	520	10	0.01923	0.00047	0.0346	1.1
E7	2980	385	5	0.01299	0.00039	0.0151	0.5
E8	645	435	3	0.00690	0.00039	0.0017	0.1
E9	3440	690	5	0.00725	0.0002	0.0050	0.2
E10	1865	545	5	0.00917	0.0002	0.0034	0.1
E11	1200	420	3	0.00714	0.0001	0.0009	0.0
E12	2090	720	10	0.01389	0.0001	0.0029	0.1
E13	3830	850	10	0.01176	0.0001	0.0045	0.1
E14	6800	1430	10	0.00699	0.0001	0.0048	0.1
E15	880	825	10	0.01212	0.0002	0.0021	0.1
E16	890	850	10	0.01176	0.0002	0.0021	0.1
E17	2470	980	10	0.01020	0.0002	0.0050	0.2
E18	2860	790	10	0.01266	0.0002	0.0072	0.2
E19	1825	560	10	0.01786	0.0002	0.0065	0.2
E20	780	970	10	0.01031	0.0002	0.0016	0.1
E21	2265	820	10	0.01220	0.0002	0.0055	0.2
TOTAL							4.8

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 5% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a los 40 m en la zona agrícola y a 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 22.9 hm³, al aplicar el 5% de retornos de riego como recarga efectiva al acuífero, se obtiene un volumen promedio anual de 1.1 hm³. **Rr = 1.1 hm³ anuales.**

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 por bombeo asciende a **28.7 hm³ anuales.**

7.2.2 Salidas subterráneas por flujo 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 **0.7 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas por flujo 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)
Zona Francisco I. Madero							
S1	1645	740	5	0.00676	0.0012	0.0133	0.4
S2	1570	480	2	0.00417	0.0012	0.0079	0.2
Subtotal							0.6
Zona Guadalupe Victoria							
S1	2835	390	1	0.00256	0.0006	0.0044	0.1
Subtotal							0.1
TOTAL							0.7

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 16.6 °C y 460 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 431.3 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

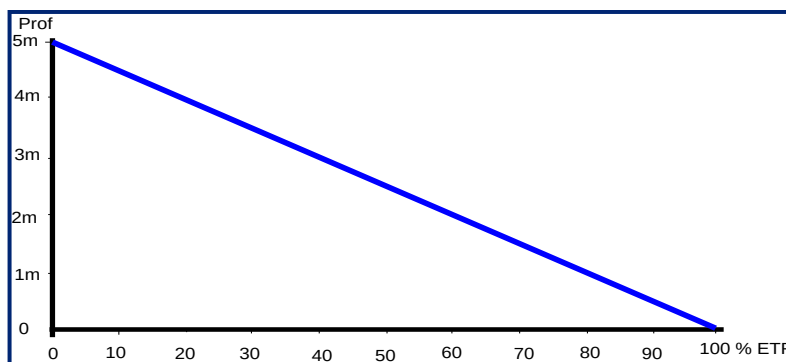
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.6		
P(mm) =	460	P ² =	211600
L =	943.7148	L ² =	890597.624
ETR (mm)	431.3		

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 10.5 km² 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 431.3 mm para el periodo 2010-2014.

Por lo tanto, que $ETR = 10.5 \text{ km}^2 * 0.4313 \text{ m} * 0.1 = 0.5 \text{ hm}^3$. **ETR = 0.5 hm³ anuales**

7.2.4 Descarga por manantiales (Dm)

En el censo realizado en el año de 2010 se reportó la existencia de 2 manantiales cuyo caudal de descarga es de 3 lps, que representan un volumen anual de 0.1 hm³.

Por lo tanto, **Dm = 0.1 hm³ anuales.**

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de las configuraciones de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2014 que se muestra en la figura 8.

Con base en ellas y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico de $S_y = 0.02$, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS =	Cambio de almacenamiento en el período analizado
A =	Área entre curvas de igual evolución del nivel estático
H =	Valor medio de la variación piezométrica en el período
S =	Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

Para el periodo 2010-2014 en la superficie de balance de 660 km², se obtuvo un abatimiento promedio de 2.5, es decir un promedio anual de 0.6 m, y un cambio de almacenamiento de -1650.0 hm³, que afectado por el rendimiento específico de 0.02 resulta: $\Delta V(S) = -1650.0 (0.02) = -33.0 \text{ hm}^3$.

Por lo tanto, el promedio es **$\Delta V(S) = - 8.3 \text{ hm}^3$ anuales.**

Solución a 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:

$$R_v = B + Sh + ETR + D_m - R_r - E_h \pm \Delta V(S)$$

$$R_v = 28.7 + 0.7 + 0.5 + 0.1 - 1.1 - 4.8 - 8.3$$

$$R_v = 15.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + R_r + E_h$$

$$R = 15.7 + 1.1 + 4.9$$

$$R = 21.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto de manera natural como incidental.

Para este caso particular, su valor es de **21.7 hm³/año**, de los cuales 20.6 hm³ son recarga natural y 1.1 hm³ 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 Madero-Victoria, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de 1.3 hm³ anuales, de los cuales 0.7 hm³ que corresponden a las salidas por lujo subterráneo horizontal que tienden a descargar hacia el acuífero vecino Valle del Guadiana, 0.5 hm³ a la evapotranspiración y 0.1 hm³ a la descarga a través de manantiales. **DNC = 1.3 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **66,258,625 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 21.7 - 1.3 - 66.258625 \\ \text{DMA} &= -45.858625 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **45,858,625 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.