

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Madero-Victoria (1005),
Estado de Durango***

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

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

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

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

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

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

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE DURANGO							
1005	MADERO-VICTORIA	22.5	0.8	26.696121	22.6	0.000000	-4.996121

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



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

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO MADERO-VICTORIA (1005), ESTADO DE
DURANGO***

México, D.F., Septiembre de 2013

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	2
	Antecedentes	2
1.1.	Localización	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	5
3.1.	Provincia fisiográfica	5
3.2.	Clima	6
3.3.	Hidrografía	6
3.4.	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA	8
4.1.	Estratigrafía	9
4.2.	Geología estructural	16
4.3.	Geología del subsuelo	17
5.	HIDROGEOLOGÍA	18
5.1.	Tipo de acuífero	18
5.2.	Parámetros hidráulicos	18
5.3.	Piezometría	19
5.4.	Comportamiento hidráulico	19
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	19
5.4.2.	Elevación del nivel estático	22
5.4.3.	Evolución del nivel estático	25
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	27
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	27
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	28
7.1.	Entradas	28
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	28
7.1.2.	Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh)	29
7.2.	Salidas	31
7.2.1.	Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)	31
7.2.2.	Bombeo (B)	32
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	33
8.	DISPONIBILIDAD	34
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	34
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	34
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	34
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)	35
9.	BIBLIOGRAFÍA	35

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPD).

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, designado con la clave 1005 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción sur-oriental 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 1706 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.

Geopolíticamente, el acuífero se localiza parcialmente dentro de los municipios Guadalupe Victoria, Cuencamé, Poanas, Durango, Canatlán y Pánuco de Coronado.

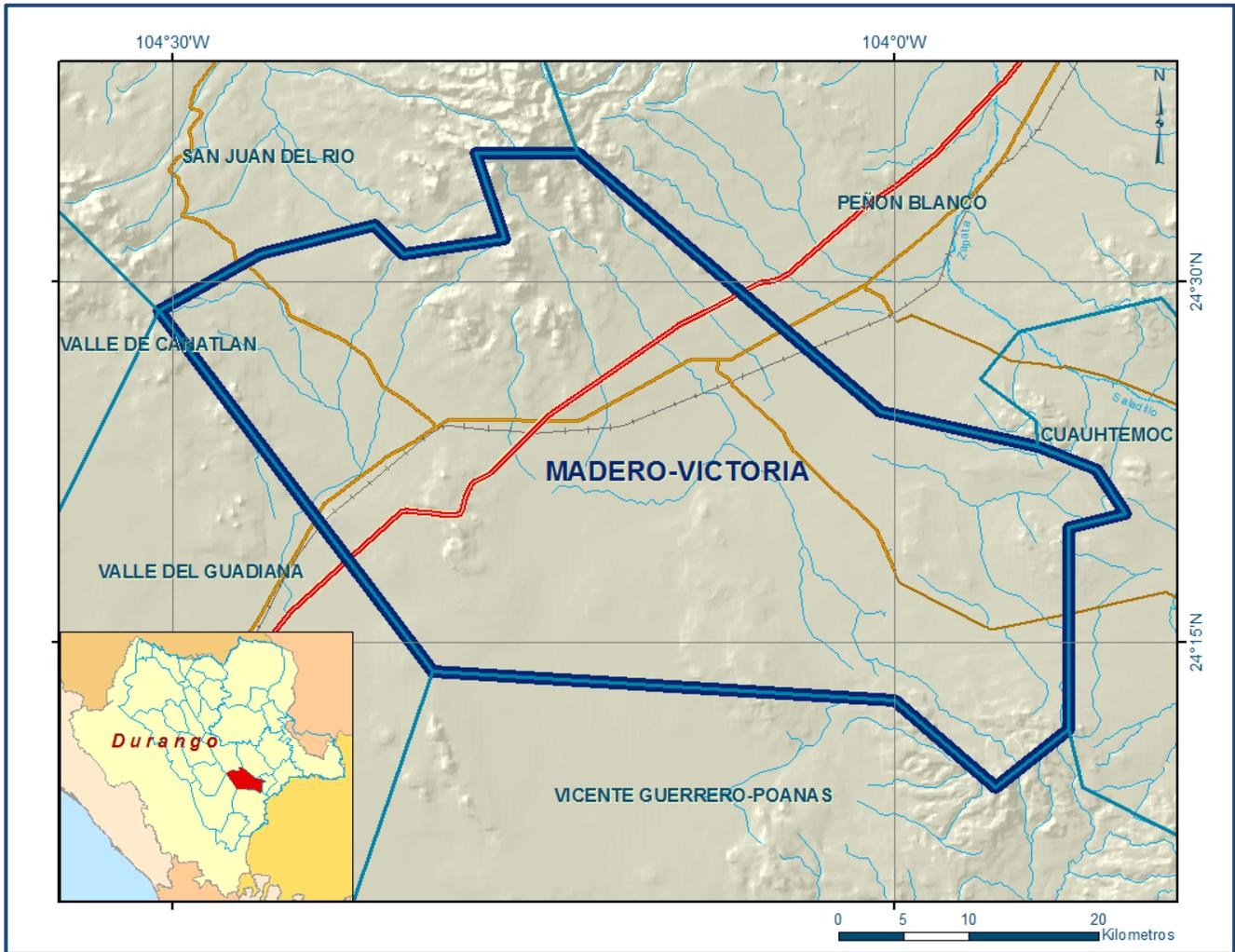


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la Poligonal simplificada 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” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local 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 a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua vigente para el 2013, el municipio Durango se clasifica como zona de disponibilidad 4, Canatlán y Poanas como zona de disponibilidad 5, Panuco de Coronado y Guadalupe Victoria como zona de disponibilidad 6 y Cuencamé se clasifica

como zona de disponibilidad 7. El principal usuario del agua subterránea es el público urbano. Dentro de los límites del acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno y a la fecha no se ha constituido Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y otros con fines de prospección minera. El más reciente que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

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; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizaran 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 y 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 Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango.

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 % del acuífero presenta un clima del tipo BS₁kw, que es un clima semiárido templado con verano cálido manifestando 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 a un quinto del promedio anual, en algunos casos las precipitaciones mínimas son menores a 10 mm y temperaturas extremas que registran oscilaciones entre 7° y 14°C. La porción noroeste del acuífero, desde Guadalupe Victoria hasta Álvaro Obregón (menos del 5% 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 los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **493.6 mm y 16.6° C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,282.8 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, cuenca Río San Pedro, que comprende los estados de Durango, Nayarit y Zacatecas, sólo algunas pequeñas zonas del acuífero, cercanas a las localidades de 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 se presenta ninguna corriente hídrica 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 3000 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 2000 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 endorréicas 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 1900 msnm, en las que se presentan algunos lomeríos al norte y al sur, constituidos por materiales clásticos terciarios 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 2000 en los valles a 2500 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 (Carta Geológica Minera G13-D73 "Guadalupe Victoria", escala 1:50,000). 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. 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).

4.1. Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero, afloran rocas sedimentarias e ígneas extrusivas e intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende edades que van del Cretácico Superior al Cuaternario (Holoceno), a continuación se describen de la más antigua a la más reciente (figura 2)

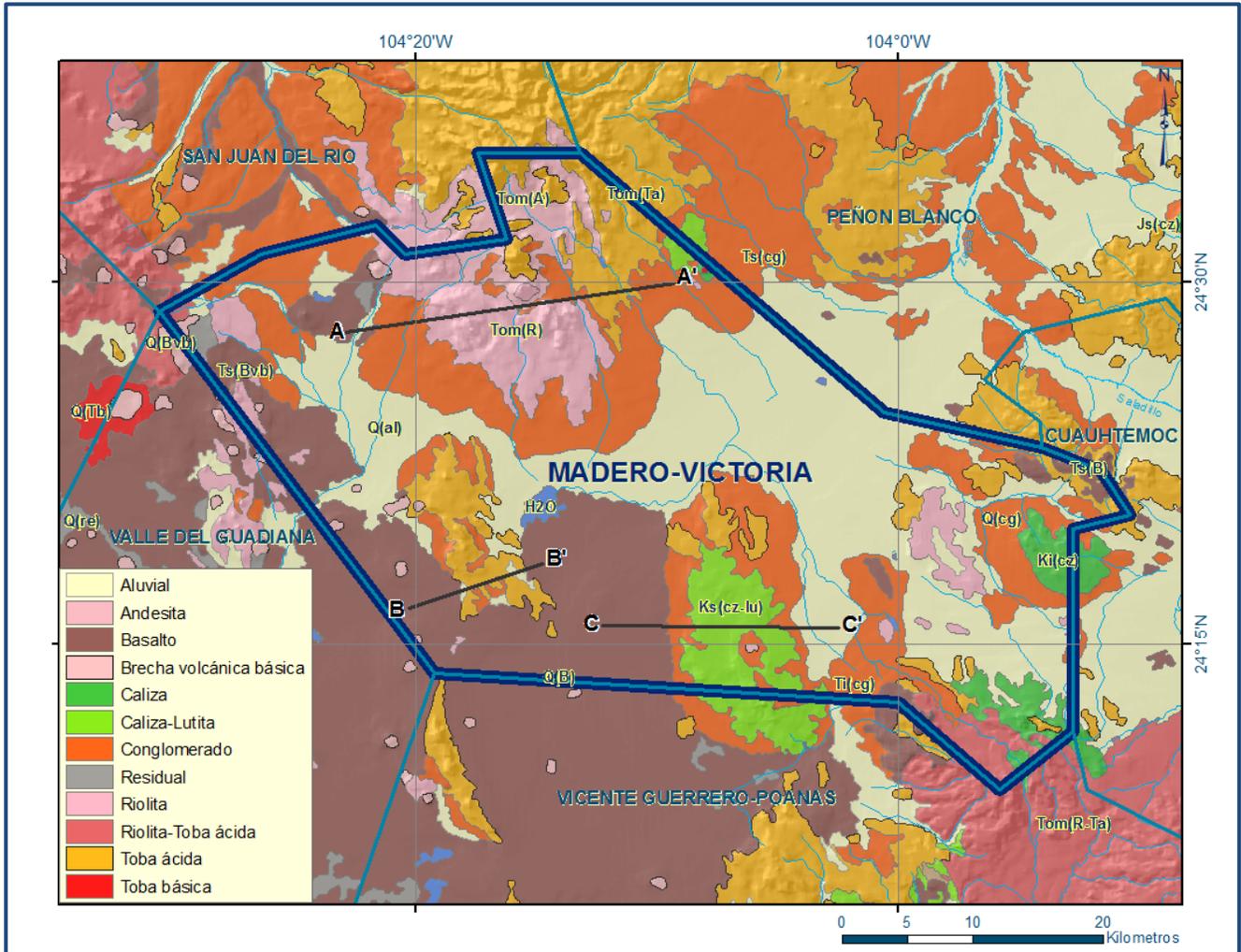


Figura 2. Geología general de acuífero

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 esta roca 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 gruesa, 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 calcilitas 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 intemperiza a café rojizo. Está expuesta en forma de lomas bajas y cordones frontales, alrededor de las sierras.; en algunos sitios se observan al nivel de los suelos, en pequeñas ventanitas, difíciles de encontrar y muy cubiertas por aluvión 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 Los Ochoa, y al este del rancho de 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, está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenita, calcilita y de rocas volcánicas, con matriz calcárea y limolítica, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris al rojizo. 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, su edad se considera del Eoceno-Oligoceno.

Complejo Volcánico Inferior

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 1400 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 Bacis 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). 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 Terciario Medio ha sido designada como el "Supergrupo Volcánico Superior" (McDowell y Keize, 1977). Éste es comparable con depósitos piroclásticos de flujo de cenizas y rocas asociadas de edad similar que cubren áreas amplias del occidente de los Estados Unidos (McDowell y Clabaugh, 1979). En el occidente de México estos dos grupos ígneos ocupan áreas similares y se pueden identificar a través de la mayor parte de la Sierra Madre Occidental. Ambos están aproximadamente paralelos a la margen occidental del continente.

La Sierra Madre Occidental es una gran región con elevaciones y depresiones topográficas que forman la margen occidental del altiplano central mexicano. En la región de Durango está profundamente disectada por ríos que fluyen hacia el este y que descienden rápidamente al nivel del mar. La parte superior está compuesta por rocas volcánicas del Terciario Medio, donde se pueden apreciar ignimbritas riolíticas espectacularmente expuestas. Ésta es probablemente la secuencia de ignimbritas continua más grande del mundo (McDowell y Clabaugh, 1979; Swanson y McDowell, 1984), distribuida en un cinturón con orientación sureste con aproximadamente 200-500 km ancho y al menos 1200 km de largo, extendiéndose desde la frontera de México con Estados Unidos, hasta su intersección con la provincia de la Faja Volcánica Trans-Mexicana. Las rocas dominantes en esta secuencia son ignimbritas riolíticas a riolíticas con un grado de soldamiento de moderado a alto. Cantidades menores de rocas máficas están usualmente presentes hacia la cima de las secuencias (McDowell y Clabaugh, 1979).

El Supergrupo Volcánico Superior fue emplazado durante un periodo de convergencia entre la placa Farallón y la placa Norteamericana (McDowell y Clabaugh, 1979; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991). Este periodo de vulcanismo paroxístico ha sido relacionado con pulsos de extensión en la porción meridional de la provincia de Cuencas y Sierras (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991,1993; Aranda-Gómez et al., 2000). Por otro lado, Nieto-Samaniego et al. (1999) consideran que el volcanismo silícico del “flareup” fue disparado por el efecto combinado de un emplazamiento extensivo de magmas básicos en la base de la corteza (mafic underplating) y el comienzo de extensión en la parte superior de la placa, inducida por el retroceso de la trinchera. Haciendo un estudio comparativo con el campo volcánico de San Juan, McDowell y Clabaugh (1979) estimaron que para producir los más de 300,000 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 caldéricos) en la Sierra Madre Occidental, de las cuales solo unas cuantas han sido moderadamente estudiadas (Swanson y McDowell, 1984; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003).

Varios autores han propuesto que algunas de estas ignimbritas fueron emplazadas mediante fisuras corticales relacionadas a la formación de grabens (Scheubel et al., 1988; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003) llamados también “depresiones vulcano-tectónicas” (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 (McDowell y Keizer, 1977), las estructuras tienen un espesor varían 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 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 gradúa 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, la forma de estos clastos es angulosa y subangulosa de tamaño variable, cementados por una matriz arenarcillosa, 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 rellenan estas depresiones.

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 rocas 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 presenta características litológicas distintivas en algunas localidades:

En el área de Peñón Blanco-La Concha (ubicada en el acuífero Peñón Blanco), predominan los clásticos gruesos; más hacia el sur cambian gradualmente a tamaños menores, pero todavía en el área de J. Agustín Castro, la facies finas están ausentes. De esta localidad hacia el sur y hasta Guadalupe Victoria, la formación presenta gran cantidad de tobas y cuerpos de lavas basálticas. En el área de la Sierra Los Palotes y en región de La Virgen-La Roca-Cuauhtémoc (en el acuífero Cuauhtémoc), presenta clásticos calcáreos (caliza, calcarenita y calcilutita) que varían de

subredondeados a angulosos, pobremente cementadas por arcillas, posiblemente derivadas de la Formación Indidura. Presenta caliches distribuidos irregularmente que aparecen en forma de capas delgadas y onduladas, de espesor variable. Algunos de estos cuerpos muestran características de travertino y se depositaron seguramente en cuerpos de agua.

La Formación Los Llanos descansa tanto sobre las rocas mesozoicas como sobre las formaciones terciarias 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 terciarias (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.

CUATERNARIO (PLEISTOCENO)

Formación Guadiana

Albritton (1958) asigna el nombre de Formación Guadiana a los derrames de basaltos 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 oscuro en superficie fresca que intemperiza a café oscuro, de textura afanítica con estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso. Estos basaltos son cubiertos por depósitos aluviales y lacustres del Reciente.

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 plagioclasa sódica (andesina–labradorita) (Labradorita-bytownita), 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 Guadalupe Victoria, 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 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 Terciario: 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. Eguiluz, 1984).

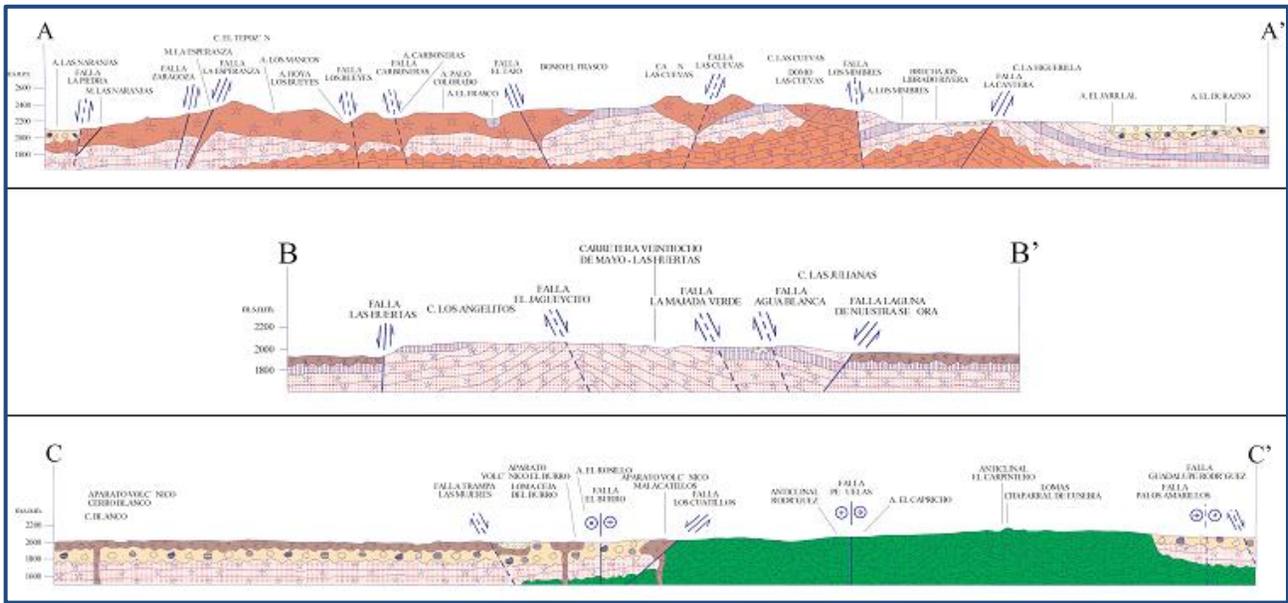
En lo que respecta a la segunda fase de deformación, está controlada por efectos tensionales terciarios que ocurrieron en la Sierra Madre Occidental. Los estudios realizados en la región describen dos grupos principales, el primero con trazas en dirección NW-SE y un segundo, que es subordinado, se presenta 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 que 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 y geofísica recaba 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 como son los 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 su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-D17 “Guadalupe Victoria” Esc. 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.

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, los resultados se presentan en la tabla 2. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos analíticos convencionales.

De los resultados de la interpretación se establece que los valores de transmisividad varían entre **0.05 x 10⁻³ y 5.07 x 10⁻³ m²/s** con un valor promedio de **1.12 x 10⁻³ m²/s**; los valores de conductividad varían de **1.64 x 10⁻⁶ y 9.91 x 10⁻⁵ m/s** con un valor promedio de **2.08 x 10⁻⁵ m/s**. Ninguna de las pruebas de

bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

Tabla 2. Resultados de la prueba de bombeo

POZO	T ($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)			k (m/s)		
	Hantush	Neuman	Promedio	Hantush	Neuman	Promedio
CNA-1005-85	5.33	4.8	5.065	0.000104	0.0000942	0.0000991
CNA-1005-150	0.295	0.295	0.295	0.00000394	0.00000394	0.00000394
CNA-1005-242	0.98	0.0694	0.5247	0.0000136	0.00000964	0.00001162
CNA-1005-318	0.848	0.321	0.5845	0.00000856	0.00000324	0.0000059
CNA-1005-359	0.175	0.196	0.1855	0.00000267	0.000003	0.000002835
CNA-1005-450	0.0652	0.0367	0.05095	0.0000021	0.00000118	0.00000164

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 los años 1995, 2003 y 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la configuración de profundidades al nivel estático para el año 1995, en la zona de explotación de Madero se registran profundidades entre 5 y 75 m, las mayores se presentan en la porción oriental, en las cercanías del poblado San Rafael (Los Chilianos), desde donde descienden en sentido noroeste, hasta la comunidad La Flor de Mayo, donde las profundidades son ligeramente menores a los 5 m (figura 4). En la porción sur de la comunidad Noria de San Juan se presenta un cono de abatimiento local, definido por la curva de 40 m.

En la zona de explotación de Victoria las profundidades oscilaban entre 5 y 90 m, las mayores se presentaron en la porción noroccidental, en las cercanías del Rancho Tinoco, las cuales descienden en sentido sureste; en la región oeste de la comunidad de Antonio Amaro se presentan profundidades superiores a los 15 m, en las inmediaciones de la comunidad Dos de Abril las profundidades son menores a los 5 m; en la zona oeste del acuífero existen profundidades entre 30 y 85 m, que se incrementan en sentido norte-sur (figura 4).

Para 2003, se observa que en la zona Madero las profundidades varían entre 5 y 75 m, en las inmediaciones de Francisco Villa los valores de profundidad varían entre 45 y 55 m. Por su parte, en la Zona Victoria, se registran profundidades que varían de 5 a 90 m; en Guadalupe Victoria se presentan profundidades entre 60 y 75 m; hacia la comunidad Carrillo Puerto las profundidades son

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el año 1995, en la zona de explotación Madero se observa que las mayores elevaciones se presentan en la parte topográficamente más alta, ubicada en la porción nororiental, con elevaciones de 1980 msnm, las menores elevaciones se registran en la porción occidental, con valores de 1890 msnm (figura 7).

Para la zona Victoria las elevaciones del nivel estático varían de 2170 a 1910 msnm, las mayores elevaciones se presentan en la porción suroriental, las cuales descienden en sentido noroeste, hasta la altura de la comunidad Madero Victoria, en donde el sentido de flujo subterráneo cambia de noroeste a suroeste.

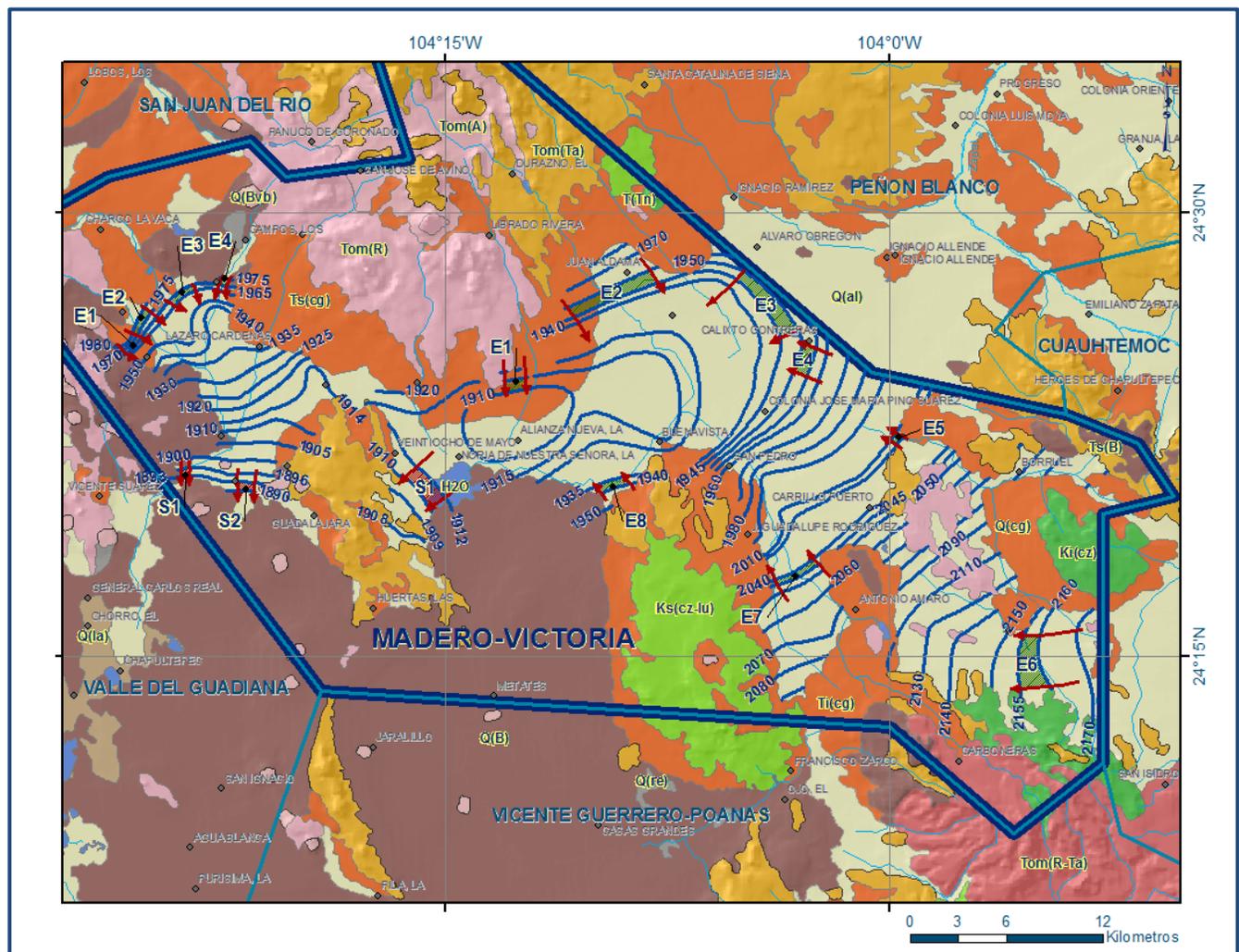


Figura 7. Elevación de nivel estático en msnm (1995)

En 2003, en la zona de Madero, se observan elevaciones del nivel estático con valores de 2005 a 1885 msnm, las mayores se presentan en la porción nororiental del acuífero y las menores en la región sur, la dirección del flujo subterráneo es de noroeste a sur y de este a sur. Al noreste de Francisco I. Madero las elevaciones son superiores a 1915 msnm.

Para la zona Victoria se presentan elevaciones con valores entre 2170 y 1900 msnm, las mayores se presentan al sureste, de tal manera que el sentido de flujo subterráneo es preferencialmente de sureste a noroeste hasta la comunidad Guadalupe Victoria, donde el sentido de flujo cambia en dirección noreste-suroeste, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo (figura 8).

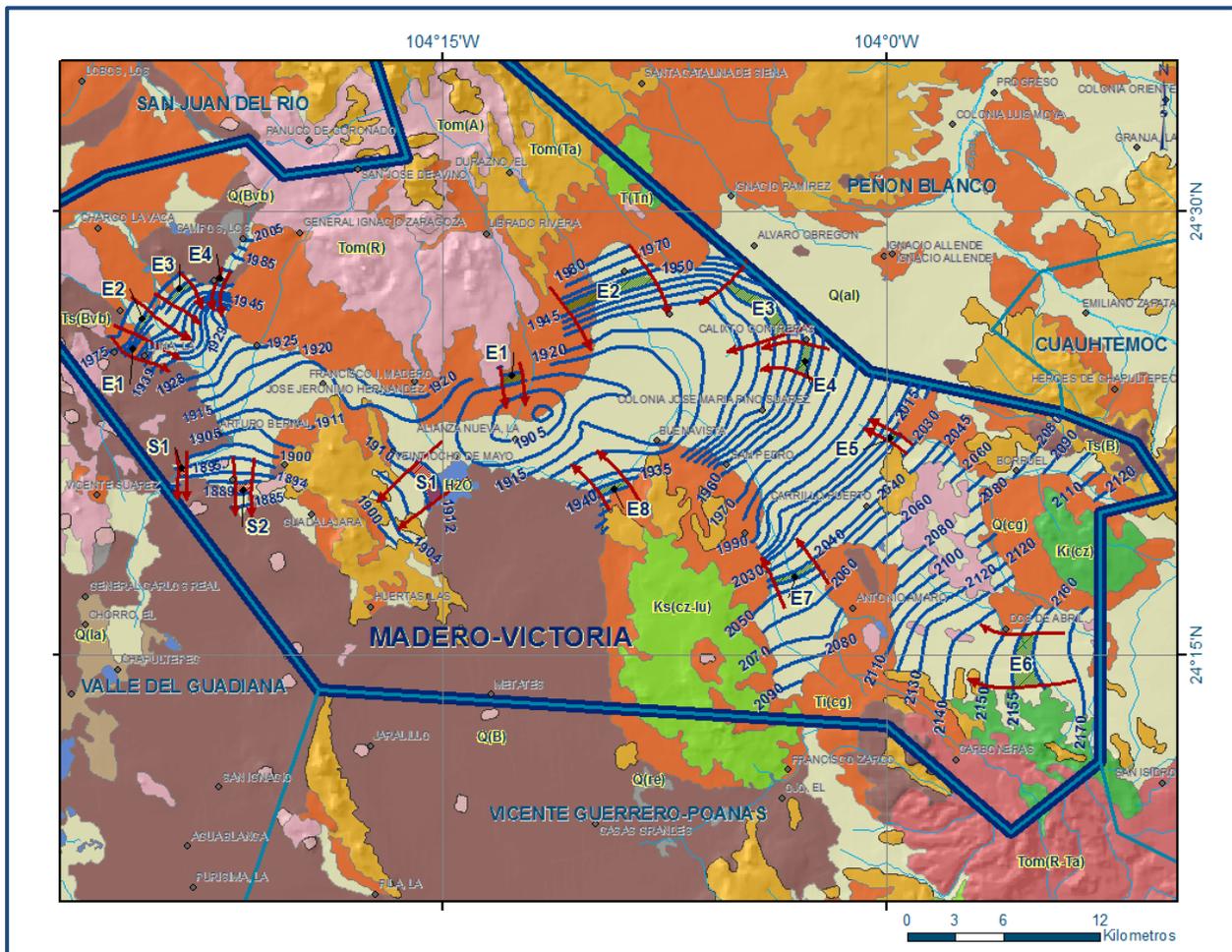


Figura 8. Elevación de nivel estático en msnm (2003)

De acuerdo a la configuración de elevación del nivel estático para el 2010, para la zona de Madero se observa que las elevaciones varían de 2005 a 1885 msnm, en la parte topográficamente más alta de la zona se presentan las mayores elevaciones, en las cercanías de la comunidades de Los Campos,

La Esperanza y La Gloria, ubicadas al noroeste del acuífero; las menores elevaciones se registran al sur, a la altura de la comunidad de la San Juanera, de acuerdo a las configuraciones se observa un sentido de flujo subterráneo de norte a sur hasta la comunidad La Noria de San Juan y de noroeste a sur en la mayor parte del área (figura 9).

Para la zona de Victoria se observan elevaciones entre 2170 y 1910 msnm, las mayores elevaciones se observan en la porción suroriental, a la altura de las comunidades Dos de Abril, y las menores se presentan en la parte oeste de la zona, la dirección de flujo subterráneo es similar a la de los dos años descritos anteriormente, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

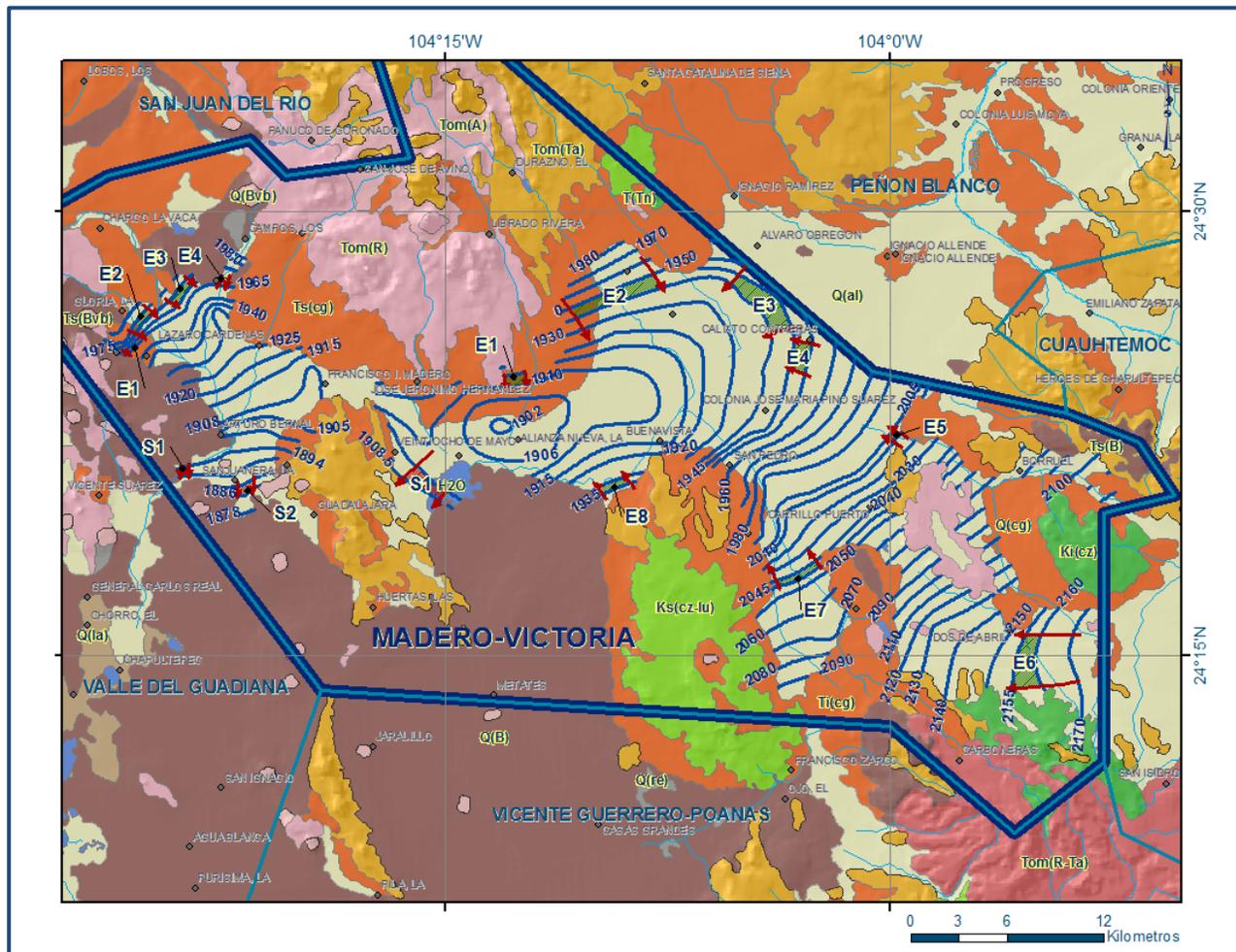


Figura 9. Elevación de nivel estático en msnm (2010)

5.4.3. Evolución del nivel estático

De acuerdo a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1995–2003, se observa que en la mayor parte del área se registró abatimiento de los niveles estáticos, a la altura de las comunidades General Lázaro Cárdenas y San Juan Bautista los abatimientos son de hasta 10 m, los cuales decrecen en forma concéntrica, hasta Francisco I. Madero. Valores de recuperación y abatimientos de 1 m se presentan en la región occidental (figura 10).

Para las zonas Victoria y Madero, las evoluciones son negativas en la mayor parte, los mayores abatimientos se presentan en la cercanía de la comunidad de Santa Catalina, ubicada al sur del área y Rancho El Tinoco en la región nororiental; en la porción occidental de la zona, a la altura del Ejido Veintiocho de Mayo, no se registran evoluciones y en la zona más occidental de esta región se registra una recuperación de hasta 2m. En la región oriental los abatimientos varían entre 0.3 y 1.0 m.

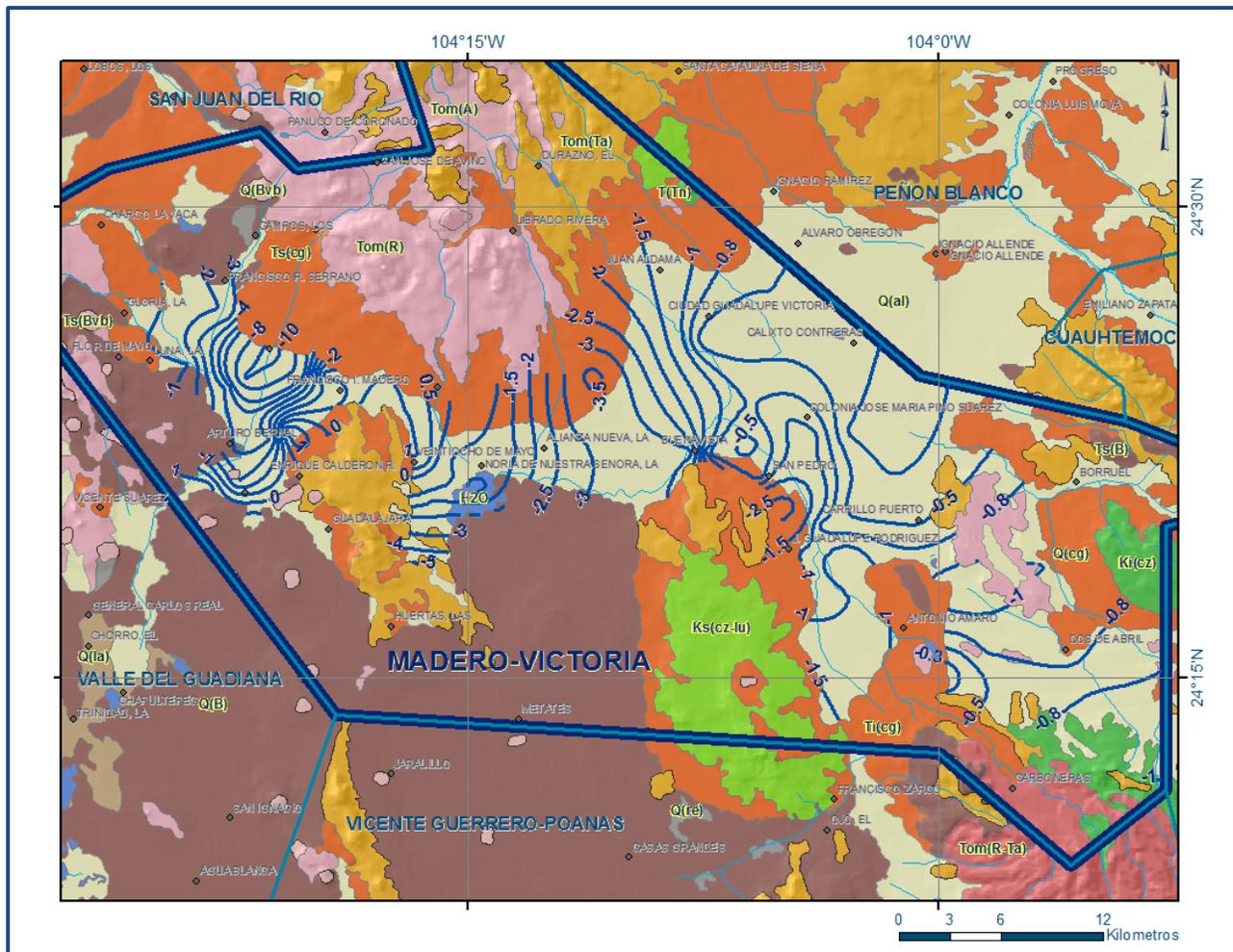


Figura 10. Evolución de nivel estático en m (1995-2003)

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2003-2010, muestra que en la zona de Madero se presentó un abatimiento general de los niveles estáticos, en su porción sur se presentan abatimientos entre 5 y 6 m, que descienden en sentido norte; en la porción central los abatimientos varían entre 2 y 3 m, mientras que en la región oeste es de 1 m (figura 11).

En el caso de la zona Victoria la mayor parte del área presenta abatimientos, se presentan dos conos de abatimiento de 5 m, uno a la altura de la comunidad Gerónimo Hernández y otro en las inmediaciones de la comunidad La Alianza. Considerando los periodos de análisis de la evolución, el abatimiento medio anual es de 0.7 m; en tanto que en la región oriental varía de 0.5 a 1.5 m.

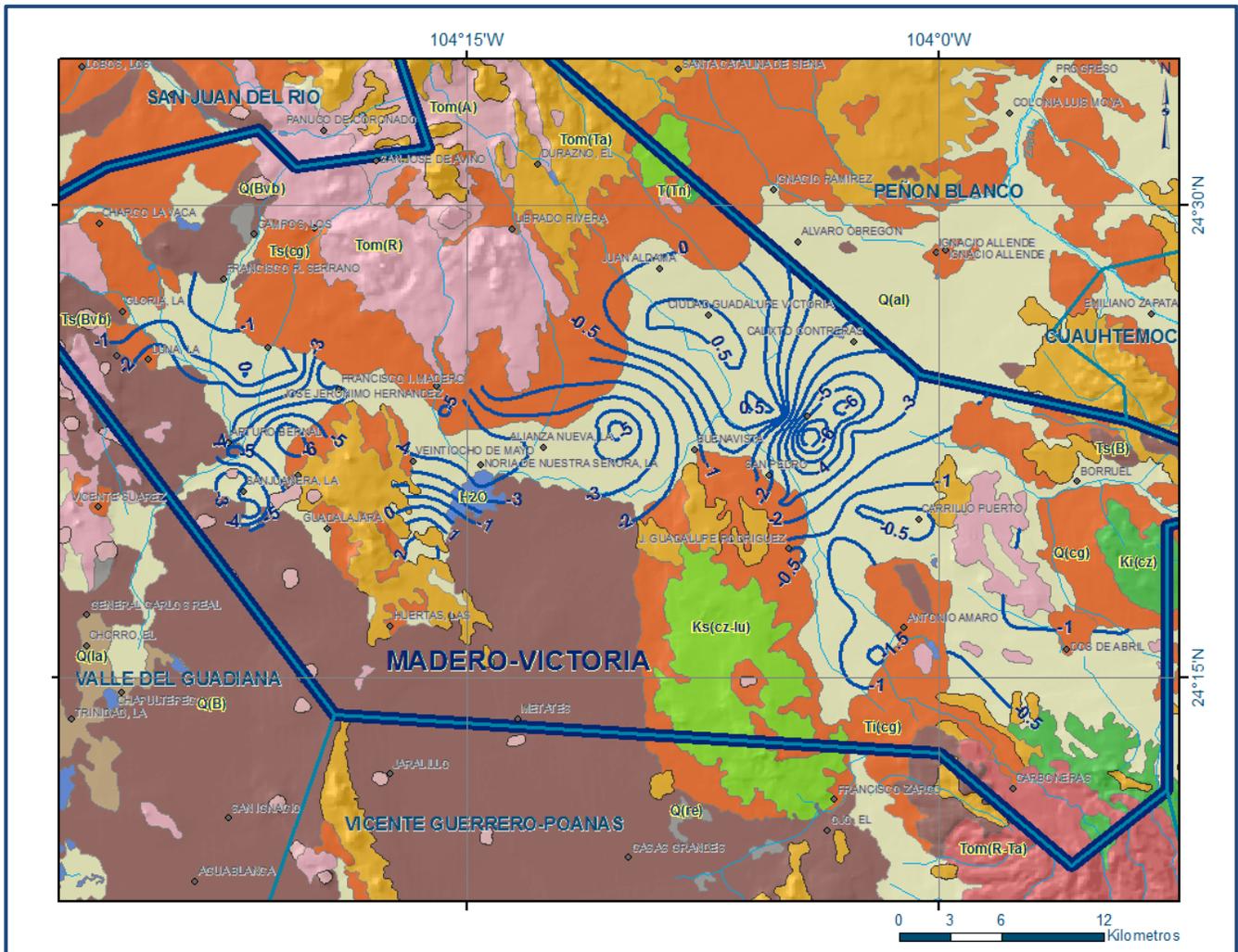


Figura 11. Evolución de nivel estático en m (2003-2010)

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, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 200 a 340 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano. Las temperaturas registradas en los sitios de muestreos varían de 21.4° C a 23.4° C y el pH varia de 7.1 a 7.9

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, las que predominan son sulfatada-sódica, sulfatada-magnésica y bicarbonatada sódica, que representan aguas más evolucionadas, que tuvieron intercambio iónico con las rocas que conforman el medio geológico.

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 C₂S₁, que representa contenido medio de sales y baja concentración de sodio, apta para el uso agrícola.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró a existencia de 388 aprovechamientos de agua subterránea, 310 pozos, 76 norias y 2 manantiales; del total de obras, 257 están activas y 131 inactivas.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **22.6 hm³ anuales**, de los cuales 16.5 hm³ (73.0%) se destinan al uso agrícola, 5.1 hm³ (22.6%) se destinan al uso público urbano, y 1.0 hm³ (4.4%) restantes para usos múltiples. El volumen aportado por los manantiales es muy pequeño, por lo que para fines de balance se considerará despreciable.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para los años 1995, 2003 y 2010 en una superficie de **553 km²**, separada en dos zonas, Madero (92 km²) y Victoria (461 km²), que corresponden a las zonas donde se tiene información piezométrica y en la que se localizan la gran mayoría de los aprovechamientos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

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

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

7.1. Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, a que los volúmenes de agua destinados a los usos agrícola y público-urbano son pequeños y a la baja permeabilidad de los depósitos aluviales del suelo, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña. Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que

el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) 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:

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

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas subterráneas por flujo horizontal;

B= Bombeo;

Sh= Salidas subterráneas por flujo horizontal;

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

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

$$Rv = B + Sh \pm \Delta V(S) - Eh \quad (2)$$

7.1.2. Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh)

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente a los años 1995, 2003 y 2010, mostrada en las figuras 7, 8 y 9. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

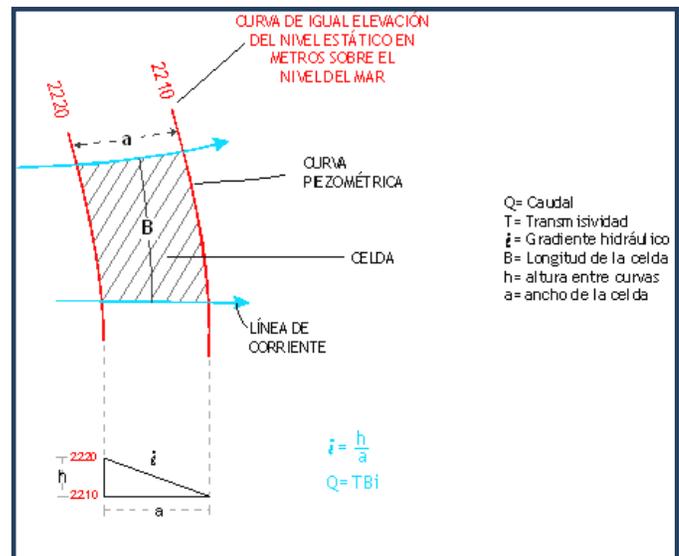
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

T = Transmisividad (m^2/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



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

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en las tablas 3 y 4 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda para cada una de las zonas.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal para la zona Victoria

CELDA	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 / s)	VOL. ANUAL (Mm^3)
ENTRADAS HORIZONTALES 1995					
E ₁	0.354	1190	0.006956	0.003	0.095
E ₂	0.098	5262	0.012216	0.006	0.189
E ₃	0.17	4727	0.005613	0.005	0.158
E ₄	0.17	1875	0.006012	0.002	0.063
E ₅	0.17	653	0.010581	0.001	0.032
E ₆	0.697	3355	0.003771	0.009	0.284
E ₇	0.697	2603	0.012783	0.023	0.725
E ₈	0.354	1753	0.009069	0.006	0.189
Total					1.7
ENTRADAS HORIZONTALES 2003					
E ₁	0.354	1197	0.007765	0.003	0.095
E ₂	0.098	5326	0.013109	0.007	0.221
E ₃	0.17	4662	0.007538	0.006	0.189
E ₄	0.17	1886	0.008218	0.003	0.095
E ₅	0.17	655	0.010252	0.001	0.032
E ₆	0.697	3375	0.003792	0.009	0.284
E ₇	0.697	2632	0.011873	0.022	0.694
E ₈	0.354	1750	0.009753	0.006	0.189
Total					1.8
ENTRADAS HORIZONTALES 2010					
E ₁	0.354	1190	0.007018	0.003	0.095
E ₂	0.098	5278	0.011571	0.006	0.189
E ₃	0.17	4350	0.005075	0.004	0.126
E ₄	0.17	1882	0.004872	0.002	0.063
E ₅	0.17	655	0.010652	0.001	0.032
E ₆	0.697	3362	0.003841	0.009	0.284
E ₇	0.697	2635	0.011705	0.021	0.662
E ₈	0.354	1723	0.009821	0.006	0.189
Total					1.6

Tabla 4. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal para la zona Madero

CELDA	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 / s)	VOL. ANUAL (Mm^3)
ENTRADAS HORIZONTALES 1995					
E ₁	1	1360	0.0187	0.025	0.788
E ₂	1.2	1710	0.0128	0.026	0.82
E ₃	1.2	1732	0.012	0.025	0.788
E ₄	4.955	467	0.0116	0.027	0.851
Total					3.2
ENTRADAS HORIZONTALES 2003					
E ₁	1	1351	0.0186	0.025	0.788
E ₂	1.2	1639	0.0144	0.028	0.883
E ₃	1.2	1735	0.0121	0.025	0.788
E ₄	4.955	465	0.012	0.028	0.883
Total					3.3
ENTRADAS HORIZONTALES 2010					
E ₁	1	1350	0.019	0.026	0.82
E ₂	1.2	1720	0.0123	0.025	0.788
E ₃	1.2	1749	0.0093	0.019	0.599
E ₄	4.955	471	0.0096	0.022	0.694
Total					2.9

El volumen de entradas promedio para el área de Victoria asciende a $1.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ y para el área de Madero es de $3.1 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que el volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **$4.8 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y por salidas subterráneas horizontales (Sh). No existen descargas por evapotranspiración (ETR), manantiales (Dm), ni descarga por flujo base de los ríos (Dfb).

7.2.1. Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)

En la zona de Madero se identificaron dos salidas por flujo subterráneo, las cuales se localizan en las proximidades de la localidad de San Martín y La San Juanera. En la zona de Victoria se identificó una sola salida, a la altura de la Laguna Nuestra Señora.

Las salidas subterráneas horizontales fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para los años 1995,

2003 y 2010 (figuras 7, 8 y 9), en las tablas 5 y 6 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total para cada una de las zonas.

Tabla 5. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal para la zona de Victoria

CELDA	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 / s)	VOL. ANUAL (Mm^3)
SALIDAS HORIZONTALES 1995					
S ₁	0.649	2434	0.0018	0.003	0.1
SALIDAS HORIZONTALES 2003					
S ₁	0.649	2594	0.0021	0.003	0.1
SALIDAS HORIZONTALES 2010					
S ₁	0.649	2429	0.0005	0.001	0.03

Tabla 6. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal para la zona de Madero

CELDA	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 / s)	VOL. ANUAL (Mm^3)
SALIDAS HORIZONTALES 1995					
S ₁	3	508	0.0059	0.009	0.284
S ₂	3	951	0.0055	0.016	0.505
Total					0.8
SALIDAS HORIZONTALES 2003					
S ₁	3	508	0.0052	0.008	0.252
S ₂	3	936	0.0043	0.012	0.378
Total					0.6
SALIDAS HORIZONTALES 2010					
S ₁	3	509	0.0053	0.008	0.252
S ₂	3	1039	0.0032	0.01	0.315
Total					0.6

El volumen de entradas promedio para el área e Victoria asciende a $0.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ y para el área de Madero asciende a $0.7 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que el volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **$0.8 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2.2. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **22.6 hm^3 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 los periodos de 1995-2003 y 2003-2010 que se muestran en las figuras 10 y 11, respectivamente. Con base en ellas y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico de $S_y = 0.01$, 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 de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

Para el área de Victoria el cambio de almacenamiento anual es de -31.1 y de -95.8 hm^3 , para los periodos de 1996-2002 y 2002-2010, respectivamente, que en promedio es -63.4 hm^3 . Con este valor y un rendimiento específico de 0.01 se obtiene: $\Delta V(S) = (-63.4) (0.01) = -0.63 \text{ hm}^3$ anuales.

Para el área de Madero el cambio de almacenamiento anual es de -32.3 y de -23.2 hm^3 , para los periodos de 1996-2002 y 2002-2010, respectivamente, que en promedio es -27.7 hm^3 . Con este valor y un rendimiento específico de 0.01 se obtiene: $\Delta V(S) = (-27.7) (0.01) = -0.28 \text{ hm}^3$ anuales.

Por lo que en conjunto, en las dos áreas se tiene un cambio de almacenamiento de **-0.9 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, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh \pm \Delta V(S) - E_h \\ R_v &= 22.6 + 0.8 - 0.9 - 4.8 \\ R_v &= 17.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + E_h \\ R_t &= 17.7 + 4.8 \\ R_t &= 22.5 \text{ hm}^3 \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\text{DAS} = R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \quad (3)$$

Donde:

DAS= Disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero;

R_t= Recarga total media anual;

DNCOM= Descarga natural comprometida;

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

8.1. Recarga total media anual (R_t)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R_t), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto de manera natural como inducida. Para este caso particular, su valor es de **22.5 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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

Para el caso del acuífero Madero-Victoria, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **DNCOM = 0.8 hm³ anuales**, que corresponden únicamente a las salidas por flujo subterráneo horizontal.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2013 es de 26'934,655 m³**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DAS} &= R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \\ \text{DAS} &= 22.5 - 0.8 - 26.934655 \\ \text{DAS} &= - 5.234655 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones, por el contrario, el déficit es de **5'234,655 m³ anuales**, que se están extrayendo del almacenamiento no renovable del acuífero.

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.

Servicio Geológico Mexicano, 2001, Carta Geológica-Minera F13-B24 "Vicente Guerrero", Durango y Zacatecas, escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2009, Carta Geológica Minera G13-D73 "Guadalupe Victoria", escala 1:50,000.