



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VILLALBA (0840), ESTADO DE
CHIHUAHUA**

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.....	5
3.1 Provincia fisiográfica.....	5
3.2Clima.....	6
3.3Hidrografía	7
3.4Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	8
4.2Geología estructural.....	13
4.3Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero	14
5.2Parámetros hidráulicos.....	15
5.3Piezometría	15
5.4Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3Evolución del nivel estático	17
5.5Hidrogeoquímica y calidad del agua	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	20
7.1.2 Retorno de riego (Rr)	20
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	20
7.2Salidas.....	21
7.2.1 Descarga por manantiales (Dm).....	22
7.2.2 Bombeo (B).....	22
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	22
7.3Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	22
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS)	24
8.4Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	24

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 Villalba, definido con la clave 0840 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 01' 00" y 28°37' 00" de latitud norte y los meridianos 106° 37' 30" y 106° 05' 00" de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 1,908 km². Colinda al norte con el Acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua Sacramento y Aldama-San Diego, al oeste y sur con Alto Río San Pedro, al este con Meoqui-Delicias (figura 1).

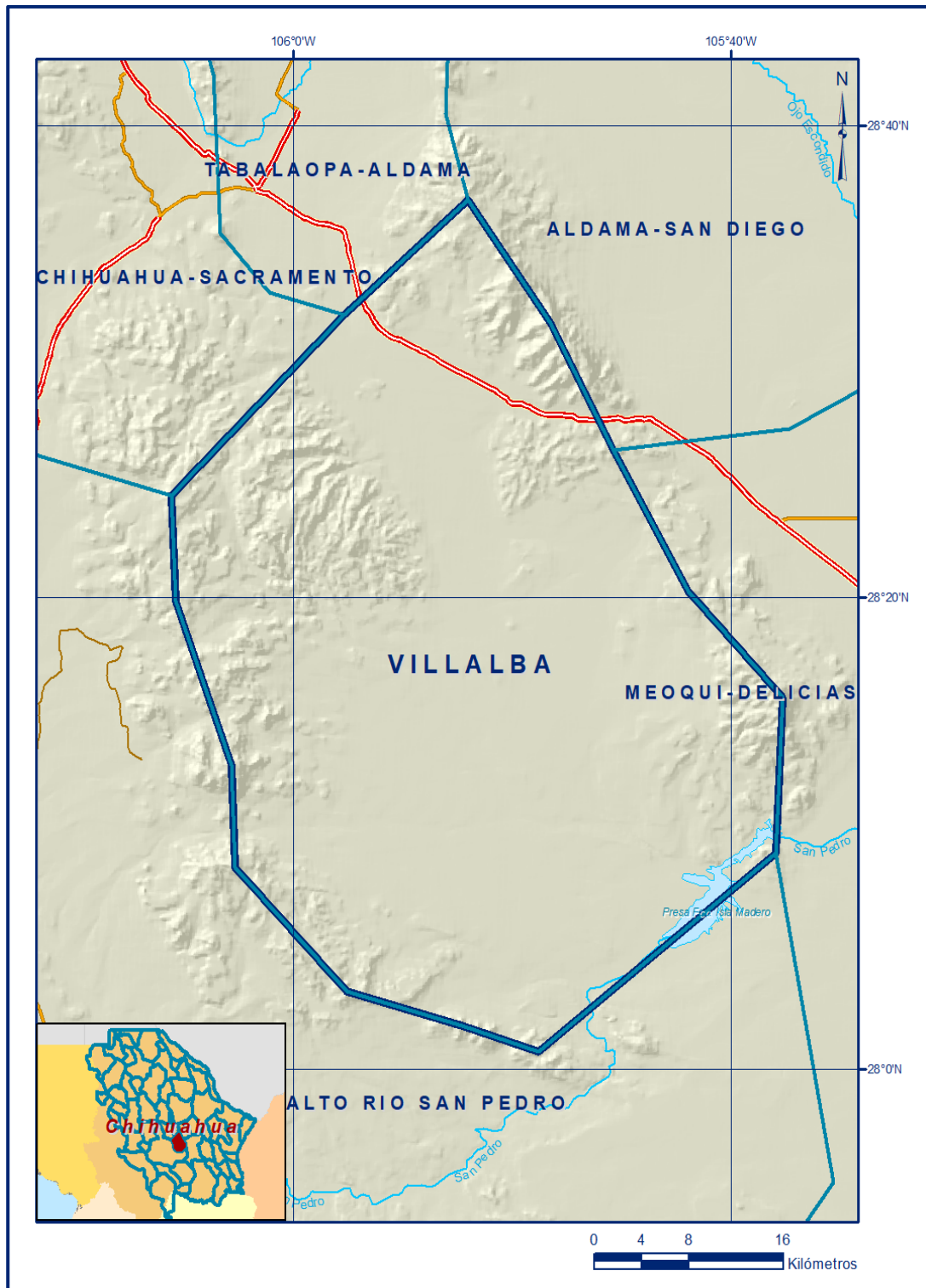


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios de Chihuahua, Aquiles Serdán y Rosales. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0840 VILLALBA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	105	48	15.5	28	31	38.7
2	105	45	24.7	28	26	16.3
3	105	41	59.6	28	20	16.6
4	105	37	40.2	28	15	46.7
5	105	37	58.2	28	9	9.6
6	105	48	49.0	28	0	46.7
7	105	52	17.7	28	1	51.9
8	105	57	34.6	28	3	19.2
9	106	2	40.0	28	8	34.1
10	106	2	49.7	28	12	53.9
11	106	5	24.2	28	19	52.3
12	106	5	34.5	28	24	19.7
13	105	57	41.8	28	31	59.1
14	105	52	3.0	28	36	50.8
1	105	48	15.5	28	31	38.7

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua; una pequeña parte de su territorio se encuentra sujeto a dos decretos de veda, en la porción norte por el “*Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región circunvecina de Villa Aldama, Chih*”, publicado el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 31 de diciembre de 1953; la porción oriente del acuífero por el “*Decreto que establece veda, por tiempo indefinido, para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona de Delicias, Chih.*”, publicado en el DOF el 16 de julio de 1962.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El principal usuario es el agrícola.

En su territorio no existen Distritos de Riego y actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado acabo algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, entre los más importantes se encuentran los siguientes:

INFORME PARA LA PERFORACIÓN DEL POZO 1BIS PARA EL C.C.C CHIHUAHUA, elaborado por la Comisión federal de Electricidad, en 2000 y 2003. Este estudio fue elaborado para la Planta de Ciclo Combinado “El Encino”, en el cual se perforaron 4 pozos profundos (300 m) en la parte norte del Acuífero Villalba, con sus respectivos registros eléctricos.

El estudio describió al acuífero como tipo semiconfinado con material aluvial formado por cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas, intercalados con pequeñas cantidades de rocas ígneas de composición basáltica.

El caudal óptimo encontrado fue de 20 lps, registrándose la profundidad del nivel estático entre los 100 y los 130 metros, mientras que el agua es de tipo dulce (bicarbonatada cálcica) con un promedio de 250 ppm de sólidos totales disueltos.

ACTIVIDADES GEOHIDROLÓGICAS EN LOS ACUÍFEROS: SANTA CLARA, ALDAMA SAN DIEGO, VILLALBA, CONEJOS MÉDANOS, TABALAOPA ALDAMA Y ALTO RÍO SAN PEDRO, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), para la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), en 2007. El objetivo principal fue elaborar un balance de aguas subterráneas y establecer la disponibilidad media anual de aguas subterráneas en los acuíferos Villalba, Alto Río San Pedro, Tabalaopa Aldama y Aldama San Diego, además de diseñar redes de monitoreo piezométrico en los acuíferos Santa Clara y Conejos Médanos.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área que comprende el Acuífero Villalba se ubica en el límite de las provincias fisiográficas Sierras y Llanos del Norte y Sierra Madre Occidental, de acuerdo a la clasificación de INEGI, 1997.

La provincia Sierras y Llanos del Norte se subdivide en cuatro subprovincias que cubren la parte norte y oriente del Estado de Chihuahua: Llanuras y Médanos del Norte, que ocupa la parte septentrional del estado; Sierras Plegadas del Norte que recorre la fracción noreste del territorio estatal. Del Bolsón de Mapimí que es una franja que se ubica del centro hacia el sur del estado y Llanuras y Sierras Volcánicas en la porción sureste.

Dentro de esta subdivisión, la mayor parte del área del acuífero queda comprendida en la subprovincia del Bolsón de Mapimí, en donde los rasgos del relieve tienen poca variedad ya que las llanuras se extienden por grandes distancias áridas y uniformes, sin otro cambio que su declive gradual hacia el oriente. Una característica particular de la zona son los grandes pilares tectónicos que forman la Sierra de Pastorías que incluye las sierras La Silla, Los Frailes, Alamillo y Villalba (al oeste) y la sierra Santo Domingo, El Ojito y sierra Alta (al este) con una orientación preferencial noroeste-sureste, una longitud de 54 km y una amplitud no mayor a los 44 km; formando éstos a su vez cuencas internas denominadas bolsones cuya pendientes suaves convergen a una amplia zona central de constitución arcillosa a limosa.

E. Raisz (1964) describe a la subprovincia de Sierras Marginales, cuya característica principal es el amplio desarrollo de sucesiones de llanuras intermontanas, amplias y alargadas, separadas por serranías de rocas volcánicas, basculadas hacia el noreste, y dispuestas en un típico patrón de bloques de fallas escalonadas. Otra parte del área de estudio se ubica en la subprovincia de Cuencas y Sierras a la que Raisz describe como una provincia que difiere un poco de su continuación con Nuevo México y Arizona. El espesor de relleno de las cuencas tiene un promedio de 1200 m, mientras que las sierras son usualmente elongadas hacia el noroeste.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de INEGI (2003), en el acuífero Villalba se pueden diferenciar tres tipos de climas: Secos (BS_0), muy secos (BW) y semisecos (BS_1). El análisis climatológico se elaboró con base en cuatro estaciones climatológicas con influencia en la zona del acuífero; km 99, canal principal (1961-1990), Presa Francisco I. Madero (1961-1990), Escuela Superior de Zootecnia (1971-2000) y Villalba (1971-2000). De acuerdo con los datos reportados por las cuatro estaciones climatológicas, la temperatura media mensual es de 22.5° C., el valor máximo mensual se presenta en el mes de junio con 30.4° C, mientras que el valor mínimo mensual se presenta en el mes de enero con 14.0° C.

Los meses más calurosos se registran de junio a julio, mientras que los más fríos en los meses de enero y diciembre. La temperatura media anual para el Acuífero Villalba es de 27 °C.

La precipitación presenta su mayor incidencia en el mes de julio, extendiéndose hasta el mes de septiembre. La precipitación media anual es de 383 mm/año. La evaporación potencial estimada es de 1,444 mm.

3.3 Hidrografía

El Acuífero Villalba pertenece a la Región Hidrológica 24, Bravo-Conchos (RH-24) a la subregión Hidrológica 24A Río Conchos, dentro de dos cuencas; Río Conchos – Presa El Granero y Río San Pedro. El acuífero queda emplazado en dos subcuencas; P. Francisco I. Madero (b) y Bachimba (f). Debido a la diversidad de rocas que afloran en los límites del Acuífero Villalba, se presentan varios sistemas de drenaje, predominando el tipo dendrítico-paralelo es el más abundante y en menor proporción el radial.

La principal corriente superficial en el Acuífero Villalba es el Río San Pedro. Con menor importancia se tiene la presencia de los arroyos San Rafael y Los Alamillos, además el Arroyo Bachimba que fluye desde el Municipio de Chihuahua, atraviesa la parte septentrional del acuífero y se interna al municipio de Julimes, en donde se une al Río Conchos. En el cauce del Río San Pedro se construyó la Presa Francisco I. Madero (“Las Vírgenes”).

Es común la presencia de numerosos arroyos y corrientes pequeñas que se originan en la sierra y desaparecen al llegar a las planicies. El drenaje es poco definido, dendrítico y subparalelo, está conformado por corrientes que tienden a desembocar en el Río San Pedro (INEGI, 2003). Salvo la presa Francisco I. Madero, ubicada en el límite sur del acuífero Villalba que surte al distrito de riego Delicias-Meoqui a través de una red de canales, no existe infraestructura hidráulica de mayor importancia en la zona.

3.4 Geomorfología

La elevación promedio en la región es de 1600 msnm, mientras que la elevación máxima es de 2340 msnm en la porción central de la sierra Santo Domingo.

Los aspectos físicos observados son erosión diferencial, escarpes pronunciados en rocas volcánicas, mesetas, lagunas endorreicas, zonas de inundación del Río San Pedro y abanicos aluviales al pie de las principales sierras. Hacia la porción este aflora la Sierra Alta, constituida por rocas ácidas, intermedias y máficas, algunas de origen hipabisal, llegan a formar estructuras semicirculares acompañadas generalmente por un fracturamiento radial abierto, sobre este tipo de rocas se encuentra encajonada la Presa Francisco I. Madero. Otra característica de estas rocas es que hacia la porción oeste de la sierra forman mesas alargadas, basculadas ligeramente al oeste y con una pendiente suave, entre ellas las conocidas con los nombres de Mesa Larga, Los Adobes, Los Lobos, La Costilla y Mesa Alta. Hacia la porción noreste aflora la continuación de la Mesa Alta, donde geomorfológicamente se comportan como mesas alargadas y basculadas ligeramente al oeste constituidas principalmente por derrames de tobas riolíticas y basaltos.

4. GEOLOGÍA

4.1 Estratigrafía

A continuación se hace una breve descripción de las unidades que afloran en la zona, cuya distribución se observa en la figura 2.

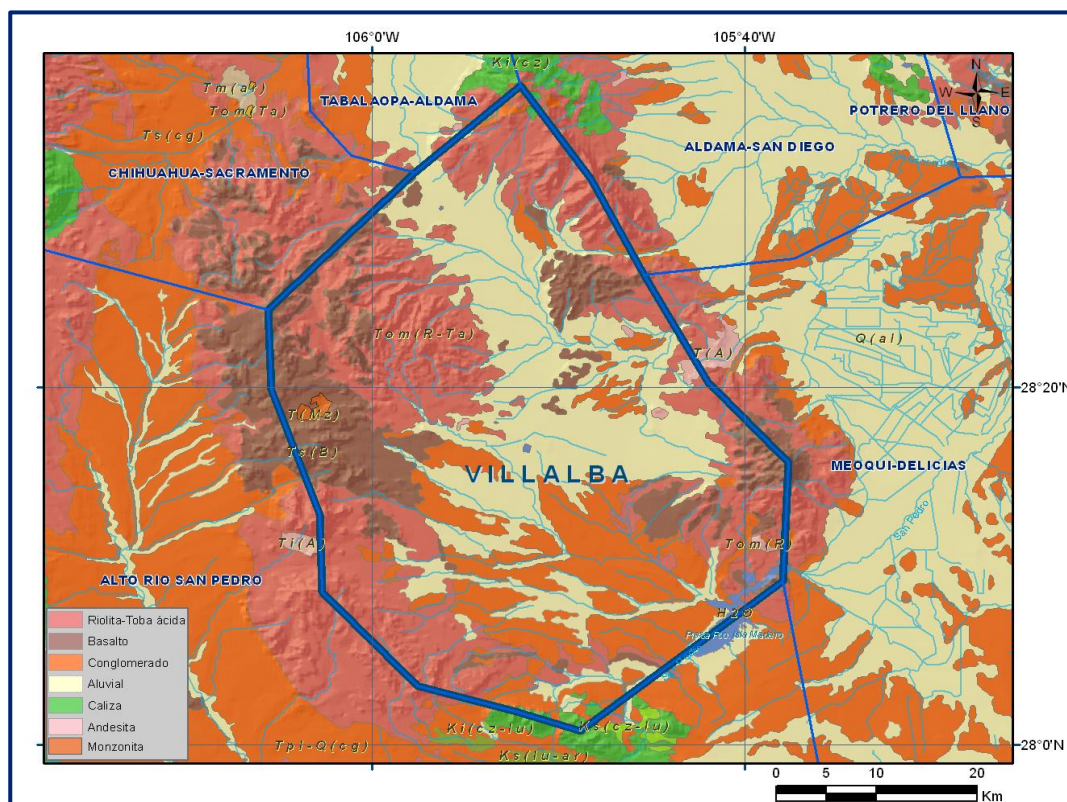


Figura 2. Geología superficial del acuífero

Grupo Aurora (Ka Cz). Se trata de calizas de grano fino tipo mudstone, predominantemente de color gris claro y con cambios textuales a grainstone. Su estratificación es masiva con estratos de hasta 3 m, se observa abundante macrofauna y vetillas de calcita en diversas direcciones con espesores de hasta 3 cm. También es común observar nódulos de pedernal oxidados.

El espesor varía de los 70 a los 250 m aunque en algunas localidades se ha reportado hasta 1450 m. El ambiente de depósito de esta unidad se considera que corresponde a facies de plataforma somera, lo que facilitó el depósito de estratos gruesos. Estratigráficamente este Grupo está en contacto tectónico (cabalgadura) con la Formación Del Río, en la base de la Sierra El Alamillo, en la porción sur del acuífero.

Formación del Río (Kce Lu-Cz). Está constituida por lutitas con intercalaciones de calizas; hacia la cima areniscas de color gris, con gran distribución en el noreste de la Cuenca de Chihuahua.

La distribución de esta unidad está restringida a la base de la Sierra El Alamillo donde se encuentra expuesta en contacto tectónico con el Grupo Aurora.

Litológicamente se encuentra representada por lutitas de color gris y gris oscuro, fracturadas, que intemperizan en ocasiones a color verde amarillento. Presenta intercalaciones de calizas mudstone y wackestone, en ocasiones arcillosas. En algunas porciones alterna con areniscas de grano fino y limolitas de color café rojizo y bioclastos. Los espesores de esta unidad son muy pequeños, del orden de 10 a 15 m.

Conglomerado Polimíctico (Te Cgp-Ar). Unidad formada por conglomerado polimíctico, con gradación, conformado por fragmentos de rocas volcánicas del Grupo Volcánico Inferior y en menor proporción rocas sedimentarias, presenta intercalaciones de areniscas de grano medio. Sus afloramientos son escasos, únicamente se localizan en el pueblo de San Pedro de Conchos.

Esta unidad se encuentra constituida por clastos bien redondeados de rocas volcánicas y en menor proporción rocas sedimentarias, contenidos en una matriz arenosa. El color que presenta es café rojizo y en ocasiones gris claro, se observa con horizontes de arenisca con estratificación cruzada.

Andesita (To A). Esta unidad está constituida por andesitas, en ocasiones de textura porfídica y en menor proporción andesitas de piroxeno, de color gris oscuro que intemperizan a color café, presenta textura fluidal y pseudoestratificación.

Su distribución es restringida, aflora únicamente al este del acuífero, en el Cerro Tres Palos y sur de la Sierra Alta. La litología que presenta esta unidad son andesitas de color gris claro, de estructura compacta y masiva, con un espesor aproximado de 50 m. Por lo general, subyace a las rocas piroclásticas de composición ácida, su contacto inferior no se observa. De acuerdo con su posición estratigráfica se le asigna una edad tentativa del Oligoceno.

Toba Riolítica. (To TR). Debido a la composición muy semejante, su edad y ocurrencia, bajo esta nomenclatura se agrupan varias unidades litológicas, tales como: tobas de caída libre, flujos piroclásticos, tobas cristalovítreas, tobas líticas e ignimbritas. Algunas tobas son columnares y presentan zonas de alteración, se encuentran intercalaciones de ignimbritas que presentan líticos deformados.

Esta unidad aparece sumamente fracturada, tiene una morfología de mesetas basculadas profundamente disectadas. Se trata principalmente de rocas color rosa a rojizas con manchas de color blanco y ocre, presenta estructura compacta y masiva, con textura volcanoclástica.

En el área de la caldera de Pastorías se localizan 6 unidades que en conjunto poseen alrededor de 2200 m de espesor y son denominadas informalmente como: Carretas, Toro, Charco, Coyote, Nuevo y Cerro Grande (Megaw, 1979), de las cuales, las más potentes son las unidades Carretas y Nuevo (800 m de espesor cada una).

Riolita (To R). Se le denomina así a la unidad riolítico fluidal de origen fisural que aflora en los márgenes exteriores de la Sierra La Silla y Los Frailes dentro de la denominada caldera de Pastorías, donde están comprendidas las unidades Toro y Cerro Grande (nombres informales); la primera fue emplazada a través de la fractura anular de la caldera después de la resurgencia, y tiene un espesor de 300 m, es rica en cristales porfídicos, con una intensa foliación de flujo. En general descansan discordantemente sobre derrames andesíticos del Eoceno y en menor proporción sobre tobas riolíticas del Eoceno; subyaciendo a tobas riolíticas o dacitas del Oligoceno. La mayor parte son generadas en fracturas anulares de calderas durante la etapa de resurgencia.

Arenisca-Toba Riolítica (To Ar-TR). Unidad formada por una secuencia de areniscas y tobas riolíticas con pequeños niveles conglomeráticos, se presenta en horizontes delgados color crema. Aflora únicamente al noroeste de la Presa Francisco I. Madero, sobre las mesas Los Adobes y Los Lobos.

La litología consiste básicamente de areniscas de grano fino a medio, de estratificación delgada y gruesa; es evidente la alternancia de tobas arenosas con cementante de sílice; en algunas porciones la secuencia contiene pequeñas intercalaciones de conglomerado bien gradado, compacto, los fragmentos son redondeados, su espesor varía de 5 a 10 cm.

El espesor que se estima para ésta unidad queda comprendido entre 100 y 150 m. Su contacto inferior no se observó, pero se infiere que descansa discordantemente sobre tobas riolíticas del Oligoceno.

Basalto (To B). Se encuentra constituida por derrames de basalto de olivino con textura intergranular, porfídica con fenocristales de olivino y de plagioclasa, en ocasiones presenta amígdalas de sílice y tiene la apariencia de una roca vítrea, en algunas localidades se observa como andesita basáltica; morfológicamente forma mesetas y lomeríos de suave pendiente.

Los afloramientos principales se observan en la sierras Los Ojitos, Mesa Los Lobos y porción suroeste de la Sierra Santo Domingo. La litología se encuentra formada por basalto de color gris claro a gris oscuro, con estructura compacta y textura amigdaloides, presentan numerosas fracturas rellenas de calcita y hematita, alterándose a montmorillonita. Su espesor varía de 20 a 100 m.

Conglomerado Polimíctico (Tm Cgp). Esta unidad se definió por su similitud con el Conglomerado San Rafael, se trata de una unidad conglomerática, constituida por fragmentos de caliza, arenisca, lutita, riolita, basalto y tobas, etc. de color café a pardo rojizo, con una distribución amplia en la zona. Esta unidad se encuentra distribuida hacia la porción centro sur del Acuífero Villalba, particularmente en los ranchos Los Alamitos, El Saucillo y El Ojo de la Morita. Litológicamente se encuentra constituido por fragmentos de caliza, lutita, arenisca, riolita, basalto y riolitas, se presenta de color café a pardo rojizo y en algunas porciones grisáceo, se caracteriza por estar englobado en una matriz areno-arcillosa, más o menos bien compactado.

El tamaño de sus partículas varía de 1 mm hasta 30 cm de diámetro, con fragmentos de angulosos a redondeados. El espesor de la unidad varía de 5 hasta 150 m en la zona cercana a la Presa El Granero.

Basalto (Tm B). Unidad ígnea efusiva, generalmente forma derrames de gran magnitud, por extrusión fisural o de un cono central. Sus afloramientos se encuentran distribuidos al sur del área de estudio (cerros El Panal, El Ruido y Corralitos). Litológicamente la roca se presenta masiva, gris oscuro a negro, ocasionalmente se observa con tintes rojizos, vesículas rellenas de calcita, presenta esporádicas intercalaciones de horizontes de escoria volcánica; al intemperismo desarrolla formas esferoidales. Su espesor varía de 20 a 60 m. Descansa discordantemente sobre conglomerados Neógenos del Mioceno, se encuentra cubierto por depósitos aluviales y conglomeráticos del Cuaternario.

Conglomerado Polimíctico (Qptho Cgp). Son depósitos conglomeráticos depositados en facies continentales, derivados principalmente de rocas ígneas y escasas rocas sedimentarias, generalmente estos conglomerados presentan muy poca compactación, se encuentra la mayoría de las veces deleznable y poco compacto, se localiza en las partes topográficamente bajas. Sus principales afloramientos están expuestos sobre los arroyos El Agua, Charcos Prietos y al norte de la presa Francisco I. Madero.

Litológicamente se encuentra constituida por fragmentos de todas las rocas aflorantes en el área, tanto caliza, riolita, arenisca, lutita, basalto, etc., se caracteriza por presentar fragmentos angulosos y subredondeados, evidenciando poco transporte, mal clasificados, unidos por una matriz limo-arenosa.

Limo-arena (Qho lm-ar). Son depósitos sedimentarios constituidos principalmente por limos, arenas y arcillas. Tienen una distribución amplia en el área de estudio; su depósito es el resultado de la desintegración de las rocas preexistentes, los constituyentes principales son materiales de la composición de la roca madre (in situ), con muy poco transporte. Su espesor varía de 0.1 m hasta los 2 m, se correlacionan con los depósitos de coluvión, sobreyacen discordantemente a conglomerados del Holoceno-Pleistoceno y de la misma forma a las rocas que se han desintegrado por erosión, dando origen a esta unidad.

Aluvión (Qho al). Este tipo de material corresponde al último depósito del Holoceno y está representado por gravas, arenas y arcillas como resultado de la erosión de las rocas preexistentes y que actualmente se continúa realizando con las crecientes de arroyos y ríos. Sus afloramientos se restringen a los cauces de los arroyos Los Carrizos, El Saucillo, San Rafael y Río San Pedro.

4.2 Geología estructural

El control estructural de la Sierra de Santo Domingo es de vital importancia debido a que fue afectada por al menos por dos deformaciones, la primera fue la Orogenia Laramide, la cual plegó la secuencia sedimentaria formando un suave anticlinal (Anticlinal Santo Domingo) de rumbo norte-sur, lo que generó un fracturamiento característico de esta estructura.

La segunda deformación corresponde al evento de Cuencas y Sierras, que por ser de tipo distensivo generó fallas normales en varias direcciones, que se manifiestan a través de arroyos alineados y escarpados, tales como Arroyo La Chinche, Los Picachos, Potrero de Mápula y las cañadas Las Palomas, La Virgen, La Víbora y La Cantera.

Dentro del Acuífero Villalba, en la porción suroeste de la Sierra Santo Domingo, se presenta la prolongación de las fallas La Central y Oriente - Poniente, lo cual genera la posibilidad de que estas estructuras aporten agua al acuífero a través de un sistema de flujo regional.

4.3 Geología del subsuelo

Con el propósito de tener un panorama general de la geología del subsuelo, a continuación se describe un corte litológico del Pozo Bachimba 1, ubicado a 8 km del poblado Lázaro Cárdenas, en el Municipio de Rosales, con coordenadas (UTM) 436,389 y 3,148,520, cuya descripción de la geología del subsuelo es representativa de la zona, ya que las condiciones geológicas regionales tienen pocas variaciones.

El informe del pozo realizado por Petróleos Mexicanos en el estudio Control geológico de la Perforación Exploratoria del Pozo Bachimba 1 (1991), cita lo siguiente “Las rocas más jóvenes perforadas por este pozo paramétrico son de origen lacustre con un espesor de 450 m, las cuales sobreyacen a rocas ígneas extrusivas de 1825 m de espesor; estas a su vez sobreyacen a un conglomerado calcáreo de 101 m de espesor.

A este conjunto de rocas se les incluyó el Cenozoico Continental Indiferenciado con un espesor total de 2376 m, que descansa sobre rocas sedimentarias marinas de facies de plataforma y mar abierto con un espesor de 1527 m.” Para mostrar una perspectiva general de la geometría del acuífero, se presenta la sección A - A' (figura 3), la cual evidencia la presencia de un valle limitado por sierras o altos estructurales compuestos por material volcánico cuya permeabilidad varía de media a alta.

Este material subyace a la zona de valle, y tiene un espesor promedio entre 150 y 200 m. Bajo el material volcánico se encuentra una secuencia carbonatada intercalada con lutitas, a la cual se le atribuye una permeabilidad media.

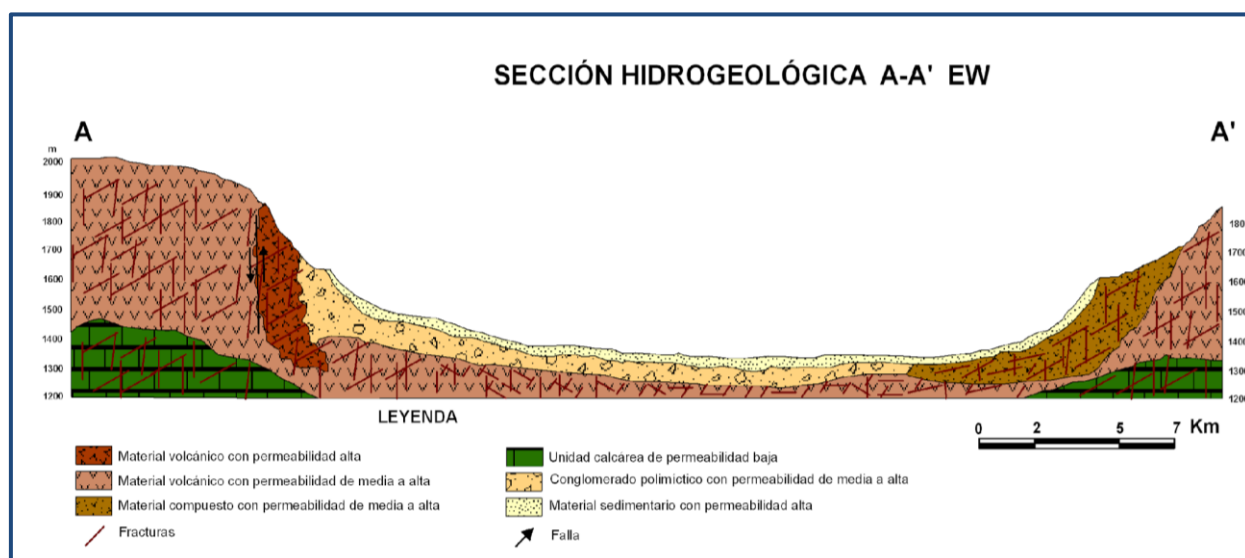


Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Se trata de un acuífero semiconfinado cuya permeabilidad varía de media a alta, el material relleno está constituido de areniscas de grano fino intercaladas con abundantes arcillas y limos estratificados que generan semiconfinamientos locales. Tiene como principal fuente de recarga la infiltración de agua de lluvia que ocurre en zonas topográficamente altas con permeabilidades que varían de media a alta, en menor proporción una fuente de recarga es la lluvia que se infiltra en la zona de valles. Su espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de los piedemonte, hasta algunos cientos de metros en el centro del valle.

El basamento sobre el que descansa la secuencia paleozoica y mesozoica está constituida por gneises, anfibolitas, granitos y otras rocas metamórficas de edad Precámbrico, que han sido sometidas a fases compresivas y distensivas y que conforman grandes bloques emergidos y/o hundidos.

5.2 Parámetros hidráulicos

La estimación de parámetros hidráulicos (transmisividad y conductividad hidráulica) se basó en la ejecución e interpretación de 3 pruebas de bombeo ejecutadas por el Servicio Geológico Mexicano y 2 realizadas con anterioridad por la Comisión Federal de Electricidad. En ambos casos se ejecutaron tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, el tiempo promedio de bombeo fue de 5 horas.

Los resultados de la interpretación indican valores de transmisividad que varían de 432 a 1379 m²/día al descartar valores máximos y mínimos la transmisividad media es de 0.0106 m²/s (900 m²/día), la cual tiene variaciones en función de la granulometría de los depósitos donde se alojan los aprovechamientos. En cuanto a la conductividad hidráulica se reportan valores que oscilan entre 1.62 a 2.28 m/día, con un valor promedio de 2.3×10^{-5} (1.95 m/día). Es importante mencionar que en 2 pruebas de bombeo se contó con pozo de observación, en éstas se obtuvo un valor promedio para el coeficiente de almacenamiento de 3.75×10^{-3} .

Las pruebas de bombeo arrojan parámetros hidráulicos altos, sin embargo estos no predominan en la gran mayoría del acuífero, por lo que para estimar entradas y salidas de flujo subterráneo se utilizaron valores promedio. Los gradientes hidráulicos varían de 0.005 a 0.01 debido a los cambios de permeabilidad en los depósitos granulares con mayor contenido de arcillas, en contraste con las arenas gruesas y la proximidad con las rocas graníticas de baja a muy permeabilidad.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad al nivel estático presenta niveles someros y profundos, como resultado de zonas con presencia de semiconfinamiento (Figura 4).

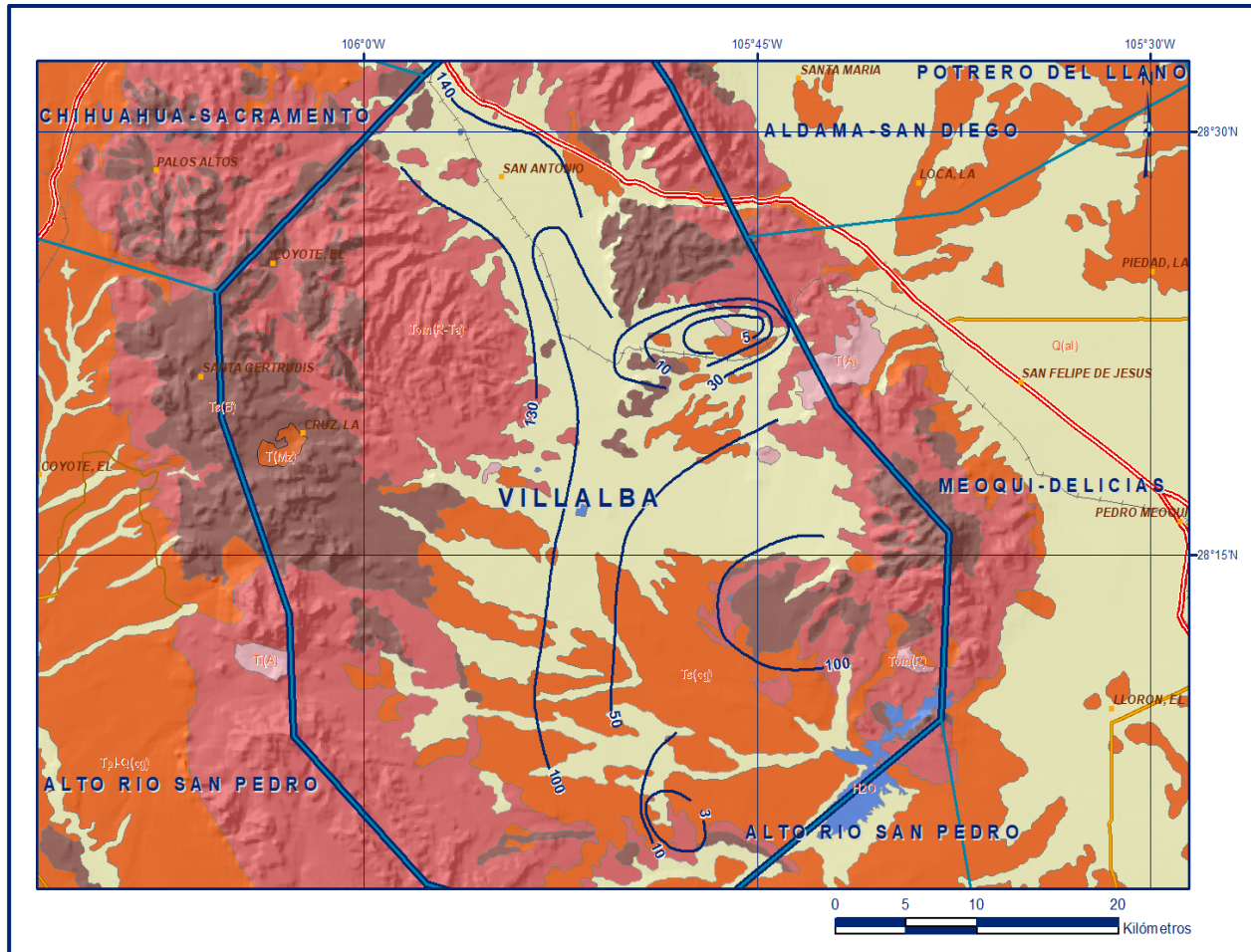


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2007)

Al norte del área se encuentran profundidades máximas (de 100 a 150 metros), mientras que en la zona centro-norte las profundidades varían desde 10 m, al noreste de la comunidad Horcasitas, hasta mayores de 100 m en el extremo centro-poniente; estas variaciones de niveles están asociadas a la presencia de lentes arcillosos y cambios estructurales del subsuelo.

La información indica que en el centro del acuífero existe una zona que funciona como barrera natural, lo anterior evidenciado por cambios en el comportamiento de drenaje superficial y diferentes tendencias en el comportamiento piezométrico; al extremo sur del acuífero los niveles piezométricos tienen profundidades desde 5 metros en los alrededores de la Presa Francisco I. Madero, hasta más de 50 metros a medida que se avanza hacia el extremo oriente del acuífero, en la zona de pie de monte.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para 2007 (Figura 5) presenta elevaciones que varían de 1,280 hasta 1,400 msnm, los valores más altos se registran hacia la porción norte del acuífero y los menores hacia el sureste, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

La configuración de elevación del nivel estático evidencia la presencia de entradas y salidas naturales del acuífero a través de flujos horizontales. Se trata de entradas provenientes del extremo poniente del acuífero, y de una salida en el extremo oriente, al sur de la comunidad Ciénega de los Padres, mientras que una segunda salida se localiza en el extremo sur del acuífero.

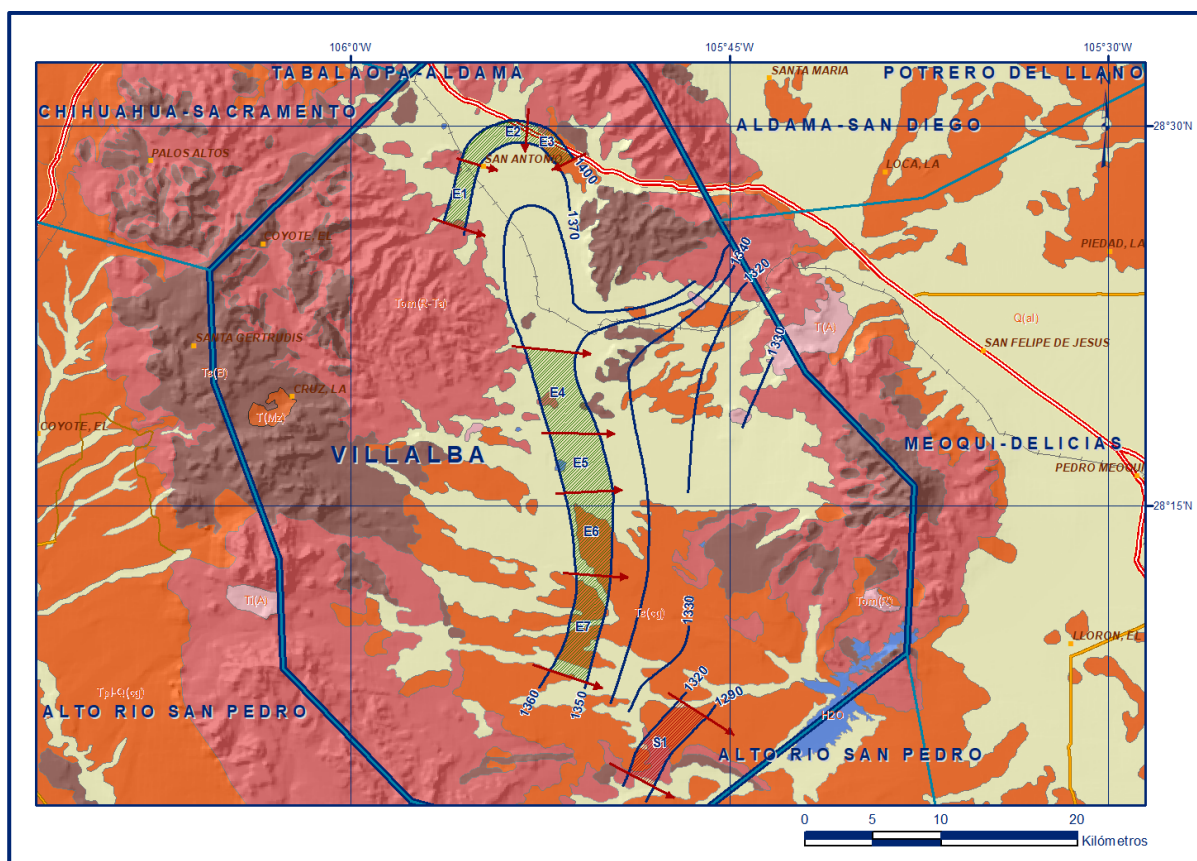


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Es importante mencionar que las escasas mediciones del nivel estático se encuentran dispersas en tiempo y espacio, no cubren en su totalidad la extensión del acuífero y su correlación es poco confiable.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra aún alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua

De acuerdo a muestras tomadas en 2003 en aprovechamientos ubicados en la zona norte del acuífero, en pozos ubicados al interior de la Planta de Ciclo Combinado, El Encino.

Los resultados obtenidos indican que la calidad del agua es buena, se clasifica como tipo sódico-mixta, que cambia de Bicarbonatada-Cálcica-Sódica a Clorurada-Bicarbonatada-Sódica-Cálcica, con un rango de 250 a 400 ppm de sólidos totales disueltos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Del censo de aprovechamientos de 2007, se tiene un total de 68 aprovechamientos, de estos 49 son pozos, 15 norias y 4 manantiales.

Del total de aprovechamientos, el 29.8% de usos múltiples, 25.5% para uso pecuario, 14.9% para agricultura, 8.5% para uso público-urbano, 8.5 % para uso industrial y el 12.8 % en otros usos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en 5.0 hm³ anuales, de los cuales 3.71 hm³ son para uso agrícola, 1.03 hm³ para usos múltiples, 0.10 hm³ para uso público-urbano, 0.10 hm³ para uso pecuario, 0.01 hm³ se destinan al uso doméstico, 0.05 hm³ para uso industrial

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 2007. El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 1 262 km², que corresponde a la zona donde se localizan gran parte de los aprovechamientos de agua subterránea. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

De esta manera la ecuación de balance propuesta para éste acuífero es la siguiente:

$$R_v + E_h + R_r - B - S_h - D_m = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v: Recarga vertical;

E_h: Entradas por flujo subterráneo horizontal;

R_r: Retorno de riego;

B: Bombeo;

S_h: Salidas por flujo subterráneo horizontal;

D_m: Descarga por manantiales;

ΔV(S): Cambio de almacenamiento;

Para este caso particular, dadas las pocas variaciones en niveles estáticos con respecto al tiempo, fue considerado un cambio de almacenamiento nulo, por lo cual se optó por calcular la recarga vertical considerándola como incógnita de la ecuación de balance.

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga vertical que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero.

Este volumen se integra en la componente de recarga inducida como recarga por retornos de riego (R_r).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance. De esta manera, despejando la recarga vertical se obtiene lo siguiente:

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

7.1.2 Retorno de riego (Rr)

La recarga por retornos de riego se determinó en función del volumen que se extrae del acuífero para uso agrícola. De manera general, se considera que un 20% de este volumen retorna al acuífero. En el acuífero $3.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ se destinan al uso agrícola, por lo que el valor de la recarga por retornos de riego es de **$0.7 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio 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.

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

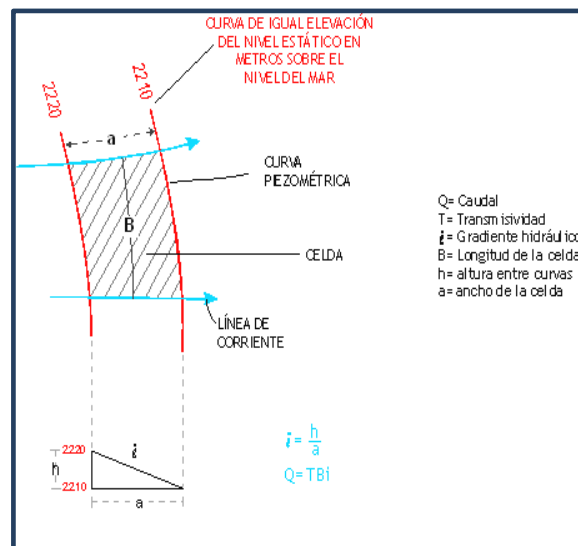
Donde:

Q = Gasto [m^3/s];

T = Transmisividad [m^2/s];

B = Longitud de la celda [m];

i = Gradiente Hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas (tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

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	4580	1235	30	0.02429	0.0012	0.1335	4.2
E2	3180	1760	30	0.01705	0.0017	0.0921	2.9
E3	2800	1400	30	0.02143	0.0017	0.1020	3.2
E4	6000	2800	10	0.00357	0.0017	0.0364	1.1
E5	4200	2800	10	0.00357	0.0017	0.0255	0.8
E6	5650	2470	10	0.00405	0.0012	0.0274	0.9
E7	7050	2800	10	0.00357	0.0012	0.0302	1.0
TOTAL							14.1

El valor estimado de las entradas por flujo subterráneo horizontal es de **14.1 $hm^3/año$** .

7.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el Acuífero Villalba las descargas están representadas por el bombeo (B), descarga por manantiales (Dm) y salidas horizontales (Sh).

Para la evapotranspiración (ETR), debido a que en la zona el mayor potencial del acuífero se encuentra por debajo de 10 m del terreno natural y a que el área con niveles freáticos someros es muy puntual, el valor de la evapotranspiración se considera nulo. Por lo que $ETR = 0$.

7.2.1 Descarga por manantiales (Dm)

La descarga natural quedó limitada a la presencia de algunos pequeños manantiales que en la zona tienen un caudal estimado de **0.1 hm³/año**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **5.0 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El volumen de las salidas subterráneas se calculó de la misma manera que las entradas subterráneas, tomando en cuenta la elevación del nivel estático (figura 5).

El valor estimado de las salidas subterráneas es de **12.4 hm³/año**, calculado en dos secciones, una en la zona centro-este y otra en el extremo sur del acuífero.

Tabla 3. Cálculo de salidas horizontales

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	6000	2100	30	0.01429	0.0030	0.2571	8.1
S2	2100	1400	30	0.02143	0.0030	0.1350	4.3
TOTAL							12.4

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

Debido a que las escasas mediciones piezométricas recabadas se encuentran dispersas en tiempo y espacio, no cubren en su totalidad la extensión del acuífero y su correlación es poco confiable (debido a que se registran valores positivos y negativos puntuales en zonas contiguas).

Por lo tanto, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes, por lo que para fines del balance se considera que el cambio de almacenamiento es nulo. **$\Delta V(S) = 0$** .

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se estima la recarga vertical por precipitación, mediante la expresión (2):

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

$$R_v = 5.0 + 12.4 + 0.1 + 0.0 - 14.1 - 0.7$$

$$\mathbf{R_v = 2.7 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

De esta manera la recarga total media anual (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 2.7 + 14.1 + 0.7$$

$$\mathbf{R = 17.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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.

Para este caso particular, su valor es de **17.5 hm³/año**, de los cuales 16.8 son recarga natural y los 0.7 hm³ restantes corresponden a la recarga inducida.

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 Acuífero Villalba, la descarga natural comprometida es de **4.4 hm³/año**, de los cuales 4.3 corresponden a la salida horizontal hacia el Acuífero Meoqui-Delicias y los 0.1 restantes corresponden a la descarga de los manantiales. Las salidas horizontales estimadas en el extremo sur no se consideraron comprometidas, debido a que descargan en el extremo suroriental del Acuífero Alto Río San Pedro, en una zona donde no hay aprovechamientos hidráulicos.

8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (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 **39,979,886 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 17.5 - 4.4 - 39.979886 \\ \text{DMA} &= -26.879886 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **26,879,886 m³ anuales.**