

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TEQUILA (1437), ESTADO DE JALISCO**

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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica.....	5
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	6
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.2 Geología estructural	14
4.3 Geología del subsuelo	15
5. HIDROGEOLOGÍA.....	16
5.1 Tipo de acuífero	16
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático	17
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1 Entradas	22
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	24
7.2 Salidas.....	24
7.2.1 Bombeo (B).....	24
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)	25
7.3 Cambio de almacenamiento(ΔVS)	25
8. DISPONIBILIDAD	26
8.1 Recarga total media anual (R)	27
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	27
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	28
9. BIBLIOGRAFÍA	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (LAN) contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015 “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 provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, 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 Tequila, definido con la clave 1437 por la Comisión Nacional de Agua, se localiza en la porción oriental del estado de Jalisco, en su límite con el estado de Nayarit, comprendido entre las coordenadas 20° 50'26" y 21° 12'18" de latitud norte, y los 103°47'33" y 104°14'20" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 961 km². Limita al norte y este con el acuífero San Martín de Bolaños; al sureste con Amatitán; al sur con Ameca, pertenecientes al estado de Jalisco; al oeste con Valle de Ixtlán-Ahuacatlán; y al noroeste con el acuífero Valle Santiago-San Blas, ambos pertenecientes al estado de Nayarit (figura 1).

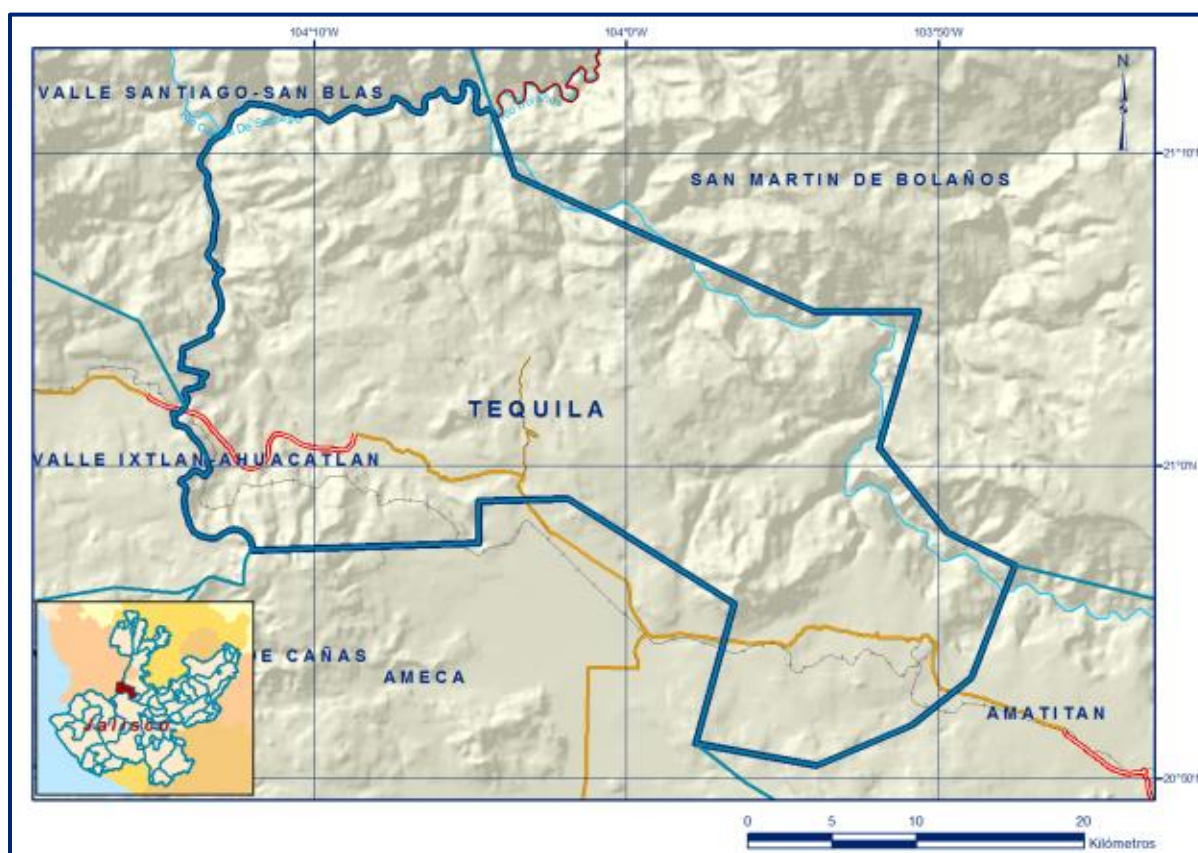


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente se encuentra ubicado en la mayor parte del municipio Hostotipaquillo, algunas regiones del municipio Tequila y pequeñas porciones del municipio Magdalena.

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

ACUÍFERO 1437 TEQUILA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	12	09	20	57	18.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	104	14	9.0	21	1	53.8	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	104	4	16.0	21	11	15.4	
4	104	3	35.4	21	9	17.7	
5	103	53	58.6	21	4	56.2	
6	103	50	38.6	21	4	56.2	
7	103	51	55.5	21	0	34.7	
8	103	49	44.8	20	57	53.2	
9	103	47	34.0	20	56	49.4	
10	103	48	57.7	20	53	14.9	
11	103	50	51.5	20	51	43.3	
12	103	53	54.8	20	50	25.5	
13	103	57	47.6	20	51	8.4	
14	103	56	32.9	20	55	35.3	
15	104	1	53.2	20	58	58.2	
16	104	4	44.0	20	58	52.9	
17	104	4	44.0	20	57	32.8	
1	104	12	09	20	57	18.4	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tequila, pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas en diversos municipios del estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios del estado de Jalisco”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de diciembre de 1987. Este decreto es de tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano.

En el acuífero no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los resultados de la recopilación de estudios previos, muestra que se han realizado estudios hidrogeológicos en 2010 y en 2020:

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS VALLE DE GUADALUPE, CUQUÍO, TEQUILA, JALOSTOTITLÁN Y COLOTLÁN EN EL ESTADO DE JALISCO. Elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para la Comisión Nacional del Agua en 2010.

Este estudio tuvo como objetivo general, actualizar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos, mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento geohidrológico, para contar con la información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la ejecución de actividades de campo que incluyeron: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este estudio fue básico para la elaboración del documento de la Disponibilidad publicada en 2018.

“ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO TEQUILA (1437), ESTADO DE JALISCO”. Elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para Casa

Cuervo, S.A. de C.V. en el año 2020. Este estudio tuvo como objetivo general, actualizar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas del acuífero, mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento geohidrológico, para contar con la información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la ejecución de actividades de campo que incluyeron: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual que recibe el acuífero. Dicho estudio representa la base para la elaboración de este documento.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Raisz (1964), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en el traslape integrado por la porción sur de la Sierra Madre Occidental (Subprovincias Mesetas y Cañadas del Sur y Sierras y Valles Zacatecanos) y la cubierta del Eje Neovolcánico (Subprovincias Guadalajara y Sierras de Jalisco). La Sierra Madre Occidental es una provincia relativamente alta, constituida por una amplia variedad de rocas volcánicas del Cenozoico; consta de cinco conjuntos ígneos principales: rocas plutónicas y volcánicas del Paleoceno, andesitas y dacitas riolíticas del Eoceno, ignimbritas silíceas del Oligoceno temprano y Mioceno temprano, coladas basáltico-andesíticas extravasadas después de cada pulso ignimbrítico y coladas de basaltos alcalinos e ignimbritas del Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario (Ferrari *et al.*, 2005).

Dicha provincia se extiende en dirección NW-SW casi en forma paralela a las costas del Océano Pacífico, abarcando aproximadamente 1400 km en su longitud a los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco. Comienza en el límite internacional con el estado de Arizona en Estados Unidos y termina aproximadamente en el río Santiago, a la altura de Nayarit, en donde se conecta con el Eje Volcánico Transmexicano.

El Eje Neovolcánico Transmexicano es una provincia de montañas altas caracterizada por ser una enorme masa de rocas volcánicas formada por grandes sierras volcánicas, coladas de lava, conos de escoria, amplios estratovolcanes basálticos, depósitos de arenas y cenizas del Terciario al reciente (Demant, 1978). Se extiende desde el Océano Pacífico en la costa occidental en la desembocadura del río Grande Santiago a la Bahía de Banderas, continuando al sureste representado por el volcán de Colima hasta llegar

al Pico de Orizaba y al Cofre de Perote, extendiéndose hasta el Golfo de México. Constituye una amplia faja de aproximadamente 880 km de longitud, abarcando territorios de los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Zacatecas, Michoacán, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Guerrero, Oaxaca, Puebla y Veracruz (INEGI, 2008).

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1990, para las condiciones de la República Mexicana, el clima que prevalece en el acuífero Tequila es el cálido subhúmedo, y en algunas regiones semiseco muy cálido y templado subhúmedo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Hostotipaquillo (14068), Magdalena (14093), Paso de Analco (14105), Paso de la Yesca (14107) y Tequila (14187), que cuentan con un periodo de análisis de 76 años (1939-2015). Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anual de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **832.3 mm, 18.3 °C y 2004.7 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El área que cubre el acuífero Tequila pertenece a la Región Hidrológica 12, Lerma Santiago y forma parte de dos cuencas: Río Santiago-Guadalajara y Río Santiago-Aguamilpa. La Región hidrológica Lerma-Santiago es la región más importante del estado, no sólo por representar el 50% de la superficie estatal, sino por incluir un 70% de población y prácticamente la mayor parte de la industria. La principal corriente de esta región es conocida como Río Grande Santiago que se origina en el Lago de Chapala.

La cuenca hidrológica Río Santiago-Guadalajara, tiene una superficie de 10,334.7 km², de los cuales solamente 602.8 km² están dentro de los límites del polígono del acuífero. La principal corriente es el Río Santiago. Existen diversos aprovechamientos superficiales que interceptan las corrientes intermitentes y perennes. Los almacenamientos que destacan son: La presa La Labor y La Fundición, localizada en la porción centro del acuífero.

La cuenca Río Santiago-Aguamilpa, dentro del estado de Jalisco tiene importancia mínima ya que solo drena en Jalisco 835.95 km².

3.4 Geomorfología

De acuerdo con los rasgos geomorfológicos de la región, el acuífero se divide en las siguientes subprovincias:

Subprovincia Mesetas y Cañones del Sur, se encuentra en casi toda la extremidad norte de Jalisco hasta el límite sur del extenso cañón que ha formado el Río Grande de Santiago, quedando su frontera suroriental en el estado al norte de la ciudad de Tequila. Forma parte de la "espinas dorsal" de la Sierra Madre Occidental. Su paisaje está constituido por altas mesetas, algunas de ellas enormes, que se interrumpen abruptamente por profundos cañones. Los sistemas de topoformas que se encuentran en esta subprovincia dentro del estado de Jalisco son: Superficie Disectada de Gran Meseta, que son agrupaciones de mesetas de tamaño pequeño; Pequeñas Mesetas; Asociadas a Cañadas; Lomeríos, que se encuentran como pequeños grupos aislados en los Pisos de Valle, generalmente amplios; Lomeríos y Cañadas, Piso de Valle con Terrazas; Piso Amplio de Valle con Lomeríos y por último Cañones.

La Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos, se localiza en pequeñas porciones al noreste de Jalisco, se caracteriza por sus sierras altas, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son a veces de pendientes suaves, pero con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago.

Los sistemas de topoformas que se encuentran dentro de Jalisco son: Las Sierras Altas con Mesetas, que se elevan de los 2,300 a los 2,850 msnm; sus laderas son abruptas cortadas por abundantes cañadas, su transición a los valles amplios es también abrupta y las crestas de las sierras en ocasiones están rematadas por pisos de mesetas, alargadas perpendicularmente al eje de la sierra y paralelas a las cañadas que bajan de ella. El Piso Amplio de Valle con Lomeríos que está formado por las partes bajas del valle, casi llena desde su contacto con las sierras que las rodean de materiales aluviales finos. Los Lomeríos Suaves producto de la erosión de antiguas bajadas de las sierras (conglomerados) o frecuentemente formados por las mismas rocas. El Cañón del río Verde-Santiago que es el único sistema en su tipo dentro de esta subprovincia y que se continua hacia el oeste, adentrándose en la parte sur de la subprovincia Mesetas y Cañones del Sur. En la zona del fondo del cañón, sobre todo al norte de Guadalajara

afloran rocas sedimentarias ricas en carbonatos, que probablemente constituyen el basamento sobre el que descansa la Sierra Madre Occidental.

La Subprovincia Guadalajara se caracteriza por las notables manifestaciones de vulcanismo explosivo, que datan de tiempos relativamente recientes y cuyas huellas se observan en la ciudad de Guadalajara y en la sierra de la primavera. A pesar de ser una subprovincia pequeña es la menos uniforme, ya que tiene una gran complejidad en su panorama fisiográfico, en el que se encuentran sistemas tan distintos como sierras, mesetas, lomeríos y llanos; sin embargo, en general su litología está constituida por rocas ígneas extrusivas ácidas, vidrios volcánicos (obsidiana) basaltos y nubes ardientes.

La Subprovincia de las Sierras de Jalisco está constituida por dos tipos básicos de topoformas generales: montañas y mesetas. Entre sus extremos norte y sur, las cadenas montañosas se encuentran acomodadas de tal modo que describen la forma de una burda letra "S". Dentro del área rodeada por la curva superior de la letra quedarían alojados los sistemas de topoformas más occidentales de la vecina subprovincia de las Sierras de Jalisco. Varias cumbres de los núcleos montañosos de rocas ígneas que componen la sierra se levantan por encima de los 2,000 msnm, en tanto que las superficies más bajas se encuentran a una altitud de 800 msnm.

La subprovincia de las Sierras de Jalisco presenta los siguientes sistemas de topoformas: Gran Sierra Volcánica Compleja o Grandes Estrato-Volcanes, Sierra de Laderas Abruptas, Sierra de Laderas Tendidas, Sierra de Laderas Tendidas con Llanos, Sierra Compleja, Escudo-Volcán Aislado, Meseta Lávica, Mesetas Lávicas asociadas con cañadas, Mesetas Escalonadas asociadas con lomeríos, Mesetas Pequeñas con lomeríos, Lomerío Suave asociado con cañadas, Valle de Laderas Escarpadas, Valle de Laderas Tendidas, Valle de Laderas Tendidas asociado con lomeríos, Cañón y Pequeño Llano Aislado.

4. GEOLOGÍA

Las rocas que constituyen al acuífero de Tequila corresponden a diversos depósitos volcánicos que presentan un rango de edad que varía desde el Paleógeno al Reciente (figura 2), pertenecientes a productos efusivos de la Sierra Madre Occidental y el Eje Volcánico Transmexicano.

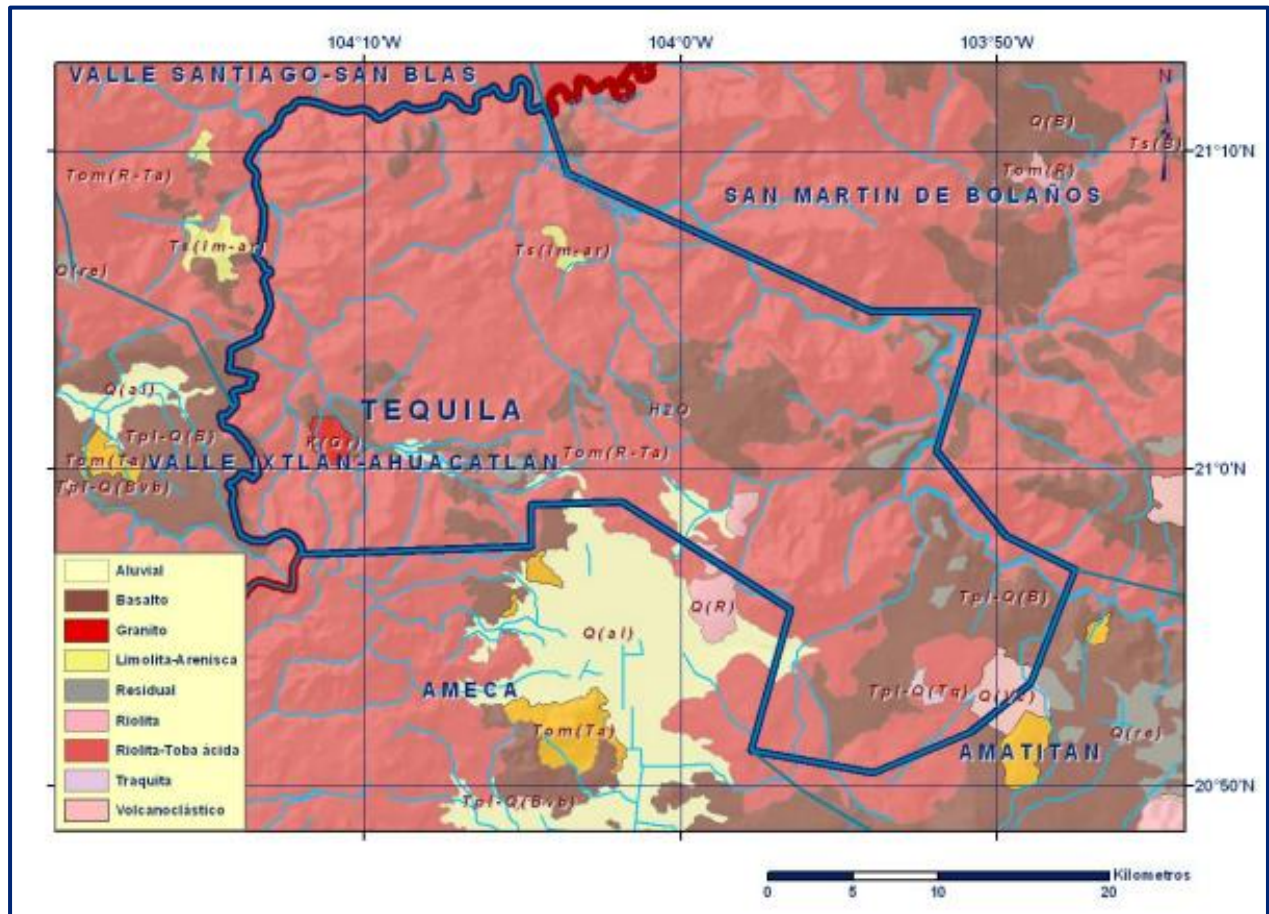


Figura 2. Geología general del acuífero

El vulcanismo del Eje Neovolcánico cubre la menor parte del acuífero en la porción sureste, parte de estos magmas ascendieron inicialmente por las estructuras de extensión que en conjunto conforman al graben de barrancas limitado por fallas normales en la porción sureste de la zona.

Las emisiones están constituidas de lavas basálticas que constituyen las mesetas inclinadas que rodean al Río Grande en el sur, que podrían alcanzar hasta más los 250 m de espesor. La disposición suave de sus pendientes inclinadas hacia el río sugiere que fueron emitidos por una fisura cubierta probablemente por productos del volcán de Tequila. Los flancos del volcán están constituidos por gruesos derrames de lavas de composición principalmente andesíticas que pasan a dacíticas, cubriendo parcialmente a las unidades anteriormente mencionadas se observan brechas volcánicas y tobas estratificados.

4.1 Estratigrafía

Las unidades litológicas que afloran en el área donde se ubica el acuífero presentan edades geológicamente jóvenes, que varían del Terciario al Reciente. A continuación,

se describen las distintas unidades litológicas.

Secuencia Volcánica Inferior (Eoceno-Oligoceno)

Está conformada por flujos de lava de composición intermedia, que afloran en la porción central y corresponden a la Secuencia Volcánica Inferior de la Sierra Madre Occidental. Es una secuencia de composición andesítica-basáltica, que presenta andesitas, tobas andesíticas y diques de la misma composición, formando derrames de lava, domos y cuellos volcánicos; presentan color gris oscuro, textura porfídica y estructura compacta masiva. En la Mesa Alta forman una pseudoestratificación con espesores de 1 a 3 cm, con alteraciones de oxidación, cloritización, silicificación, caolinización y propilitización. Presenta un espesor aproximado de 100 m; su contacto inferior es desconocido en el área de Tequila, mientras que su contacto superior es concordante y transicional con un paquete grueso ignimbrítico y riolítico que forman parte de la Secuencia Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Keiser, 1977).

Algunos autores realizaron dataciones en andesitas, que arrojan las siguientes edades, andesitas de la Sierra Morones Nochistlán datadas por el método K-Ar determinando una edad de 48.1 ± 26 Ma, correspondientes al Eoceno (Webber et al., 1994). Para las andesitas de Cerro Grande Zacatecas, el estudio de Nieto-Obregón, 1981 determino una edad del Oligoceno. Es por ello que la edad asignada a esta secuencia corresponde al Eoceno-Oligoceno.

Brecha Volcánica Basáltica (Oligoceno)

Está compuesta por brechas de composición basáltica que presentan fragmentos angulosos a subangulosos cementados en una matriz tobácea de la misma composición. Este conjunto litológico aflora muy poco, en las inmediaciones del poblado Jalpilla, en las márgenes del Río Chico. Son brechas de intrusión asociadas probablemente a un fallamiento NE-SW, que tuvo lugar durante una etapa de extensión.

La secuencia presenta un espesor aproximado de 50 m; su contacto inferior es concordante y transicional con andesitas que forman parte de la Secuencia Volcánica Inferior, y su contacto superior es concordante y transicional con un paquete grueso de riolitas e ignimbritas de la Secuencia Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental. Por su posición estratigráfica se le atribuye una edad tentativa del Oligoceno.

Andesita-Toba Andesítica

Está conformada principalmente por andesitas y tobas andesíticas que presentan un color verdoso y amarillento como resultado de una alteración hidrotermal; posiblemente corresponde a la porción inferior del Complejo Volcánico de la Sierra Madre Occidental (McDowell F. W. y Keizer R. P., 1977).

El espesor aproximado para esta unidad es de 600 m aproximadamente. Esta unidad litológica aflora en la porción NW de Tequila.

En su porción inferior presenta una andesita basáltica de color gris verdoso, de textura afanítica muy fracturada con presencia de óxidos de Fe y clorita, hacia la cima se presenta una andesita con textura fanerítica, con plagioclasas, calcita, clorita y óxidos de Fe, con fracturas rellenas por epidota. Intercaladas a este paquete litológico se encuentran tobas verdosas, gris y roja formando pseudoestratos definidos de composición andesítica, intensamente silicificadas.

La unidad litológica está afectada por un fracturamiento intenso de aspecto brechoide, y por diques de composición ácida; forma parte del Complejo Volcánico de la Sierra Madre Occidental.

Tobas Riolíticas (Oligoceno tardío)

Este paquete litológico está conformado, de la base a la cima, por una toba sin soldar color gris claro con pómez amarilla, cubierta por un basalto que lo separa de una ignimbrita riolítica, de textura afanítica, con sanidino y abundantes líticos con diámetros menores a 1 cm. Aflora principalmente al norte de Tequila, se relaciona con direcciones NE-SW y NW-SE que tiene un control estructural asociado a fallas. La toba es semicompacta, de grano fino, con clastos de pómez, líticos rojizos y cristales de cuarzo menores a 0.1 cm; presenta una intercalación de un horizonte enriquecido de pómez color ocre y blanca, subangulosa con diámetros de 0.8 cm aproximadamente, su matriz es afanítica con cristales líticos y ceniza. Castillo G.D. *et al.*, 1991, fechó una muestra en el Cerro Grande por el método K-Ar, arrojando una edad de $24.1 \text{ Ma} \pm 0.8 \text{ Ma}$, que ubica en el Oligoceno tardío y pertenecería al vulcanismo del arco de la Sierra Madre Occidental.

Riolita Ignimbrita (Oligoceno-Mioceno)

Es la unidad de mayor área de afloramiento; está constituida por derrames riolíticos y en menor proporción ignimbritas con fragmentos de piedra pómez aplanados y soldados, incluidos en una matriz vítrea. Las riolitas presentan un color café rosado, de

textura variable entre afanítica a brechoide, con cavidades rellenas de sílice y calcita, estructura compacta masiva formando pseudoestratos con espesores de 1 a 10 m. Los minerales principales son cuarzo, feldespato y manchas de óxido. La Riolita Ignimbrita alcanza un espesor de 180 m. Sus rocas pertenecen a la Secuencia Volcánica Superior, sobreyace a ignimbritas riolitas y subyacen a brechas riolíticas. Por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad del Oligoceno-Mioceno (Mc Dowell y Keiser, 1977).

Tobas y Brechas andesíticas

Este paquete litológico presenta un color gris claro, textura afanítica con un 25% de plagioclasa anhedral, escasos líticos angulosos de composición andesítica y calcedonia formando parte de la matriz. Esta unidad aflora al NW de Santa Teresa, en la porción del Domo de Magdalena. No se observa su contacto inferior por lo que no es posible estimar su espesor, yace cubierta por riolitas del Plioceno.

Grupo Guadalajara

Toba riolítica

Aflora principalmente al norte de la ciudad de Guadalajara y está conformado por una sucesión de domos riolíticos y depósitos de piroclastos, con menor proporción de lavas basálticas. En el área del acuífero aflora en un área elongada de dirección N-S. En el camino entre la Presa de Santa Rosa y El Salvador, se presentan flujos basálticos con espesores de 5 a 7 m, con cristales de plagioclasa, hornblenda y olivino; intercalados con dos flujos piroclásticos de entre 1 y 5 m de espesor, conformados por horizontes de clastos con pómez y líticos subangulosos riolíticos en gradación normal. Gilbert C.M., *et al.*, 1985, realizó estudios que arrojan edades radiométricas entre 7.2 y 2.8 Ma, para las rocas de composición riolítica y 4.7Ma a 3.3 Ma para las lavas basálticas.

Eje Volcánico Transmexicano

Basalto (Plioceno)

Nieto-Obregón *et al.*, 1985 estudió esta unidad, ubicando su localidad tipo en el poblado de Cinco Minas, Jalisco. En la zona del acuífero se presentan afloramientos al norte del poblado Tuitán, en los alrededores de Jalpilla, al N y NW de El Salvador y en Tapesco. Estos derrames presentan espesores superiores a los 100 m, de color gris oscuro con textura afanítica y vesículas rellenas por sílice, su estructura es compacta masiva y forma pseudoestratos con espesores que varían de 80 cm a 1.40 m.

Sobreyace en discordancia erosional a rocas más antiguas que son andesitas de la Secuencia Volcánica Inferior, tobas riolíticas del Oligoceno-Mioceno o bien a riolitas

ignimbritas del Oligoceno-Mioceno. La datación realizada por Nieto-Obregón et al., 1985, determinó una edad de 3.77 ± 0.7 Ma, correlacionándolas con los afloramientos del Valle de Tequila y los afloramientos del Lago de Chapala, correspondientes también al Eje Volcánico Transmexicano.

Andesita-Basalto

Aflora principalmente en el área del Volcán de Tequila y está constituida de andesitas de piroxenos, que presentan un espesor de hasta 200 m. Todos los flujos de lava son porfíricos con una matriz vítrea, que contiene entre 8% y 25% de cristales de plagioclasa y en menor proporción ortopiroxeno, augita y una matriz de titanomagnetita e ilmenita (Wallace P. y Carmichael I.S.E., 1989). Petrográficamente presenta más de un 75% de sanidino euhedral y vidrio; 50 a 70% de plagioclasa, 5 a 25% de hornblenda, biotita y augita. La unidad sobreyace a flujos basálticos del Plioceno denominados Mesa de Santa Rosa (Nieto O.J., et al., 1985), y ocasionalmente son cubiertos por domos riolíticos relacionados con la evolución del complejo Tequila.

Las edades reportadas para estas lavas varían entre 0.46 y 0.22 Ma (Harris J.M., 1986; Nixon G.T., et al., 1987), sin embargo, Allan J.F., 1986 para las andesitas del Volcán Acatlán, reporta una edad de 0.65 Ma, es por ello que se considera una edad de 0.22 a 0.65 Ma para la unidad Andesita-Basalto.

Riolita y Dacita

Constituida por riolitas y riodacitas peraluminosas, metaluminosas y peralcalinas, que forman parte del campo volcánico Acatlán y del campo volcánico Tequila, cuyas edades varían entre 0.9 a 0.23 Ma (Harris J.M., 1986). Afloran en el extremo NW del Volcán de Tequila. El campo volcánico Tequila, se localiza en la porción suroriental de la zona y pertenece a un conjunto de volcanes de dirección NW-SE, que coincide con la dirección del sistema regional de fallamiento del Graben Tepic, el Volcán Tequila es una estructura alargada que presenta la misma dirección.

Granodiorita

Garduño-Monroy V.H. et. al. 1990, realizó un estudio respecto a esta unidad litológica, ubicando su localidad tipo en San Pedro Analco y Río Grande de Santiago. Presenta variaciones en su composición, en Cinco Minas se reporta la presencia de microgranodiorita, mientras que en San Pedro Analco y en la rivera del Río Grande de Santiago es una granodiorita, de color verde oscuro, textura porfídica de grano medio a grueso, presenta ortoclasa, cuarzo, biotita, hornblenda y muscovita, su estructura es compacta masiva. Alcanza un espesor de 200 m aproximadamente.

Un estudio petrográfico realizado por el Servicio Geológico Mexicano en esta unidad litológica reporta, un mosaico granular alotriomórfico de ortoclasa, cuarzo asociado al feldespato en intercrecimientos gráficos, ortoclasa en láminas tabulares e hipidiomórficas; hornblenda en escasos granos columnares, biotita en láminas tabulares escamosas, así como minerales opacos diseminados en el mosaico granular, apatito y zircón se presentan en pequeñas inclusiones.

En la localidad Cinco Minas se dató una microgranodiorita con edad de 26.7 a 0.6 Ma y en la localidad de San Pedro Analco se dató una granodiorita con 26.6 a 0.6 Ma (Garduño-Monroy V.H. et. al. 1990). Debido a que esta unidad litológica se encuentra intrusionando a rocas volcánicas, se considera que llegan hasta el Mioceno, por lo que se infiere que deben corresponder a la parte profunda del Super Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, definido por McDowell y Clabaugh, 1979.

Cuaternalario aluvial (suelos residuales)

Depósitos constituidos por arenas pumicíticas, abanicos aluviales, depósitos de pie de monte y llanuras de inundación, que afloran en el centro de los valles, producto de diferentes agentes erosivos y de transporte. Su granulometría varía de conglomerados, arenas, limos y arcillas, En las zonas topográficamente más bajas, los horizontes arcillosos conforman zonas inundables que almacenan los escurrimientos superficiales.

4.2 Geología estructural

En los periodos Eoceno-Mioceno se desarrolla la subducción de la placa Farallón que da origen al arco volcánico continental denominado Sierra Madre Occidental. Los magmas dominantes son félsicos y pudieron generarse por fusión parcial de la corteza o por cristalización fraccionada de magmas provenientes del manto y asimilación simultánea de material cortical. Conforme cesó la subducción, inició el magmatismo intraplaca al este de la Sierra Madre Occidental y una combinación de vulcanismo alcalino y toleítico relacionado con la región del Golfo de California. Al final del Mioceno, durante el proceso distensivo se originan fallas lístricas, con asociación de fallas normales sintéticas y anti sintéticas que originan estructuras regionales como el graben Tepic-Zacoalco.

El vulcanismo observado en la porción sur es parte del Eje Neovolcánico como resultado de la subducción de la placa Rivera-Cocos debajo de una placa continental deformada y fracturada durante el emplazamiento diferencial entre América del Norte

y la placa caribeña desde el Mioceno Tardío al Reciente.

Las características estructurales son del dominio frágil y se originaron por el reajuste isostático ocurrido al final de la orogenia Laramídica, que generó fosas y pilares. En el área se localiza el graben Tepic-Zacoalco y tres direcciones de fallamiento NW-SE, N-S y E-W.

Las principales estructuras relacionadas con la conformación del graben Tepic-Zacoalco son la falla normal Cinco Minas con rumbo N50°W y echado de 70° SW, delimita al norte a la fosa tectónica Tepic-Zacoalco. La porción sur de la fosa se limita por la falla Plan de Barrancas, que tiene un rumbo de N50°W con echado de 80° NE y longitud de 8 km, afecta principalmente a roca andesíticas y ácidas de la Sierra Madre Occidental y toba riolítica del Pliocuaternario. La falla Monte de El Favor, es normal con rumbo N45°W e inclinación de 72° al SW y longitud de 27 km.

En la parte central presenta fallas conjugadas que originan un pequeño bloque hundido, este sistema distensivo está relacionado con los depósitos epitermales. Además de las fallas, se observan domos como el Ocotillo, de forma elipsoidal con un diámetro de 1.5 km, y forma parte de la secuencia de toba riolítica-riolita. El Domo Hostotipaquillo, está constituido por una riolita que presenta un flujo vertical y hacia su periferia se observa una toba vítrea, es posible su relación con el origen del ópalo (Carta Geológico-Minera Hostotipaquillo F13-D43. Escala 1:50000. SGM, 2006).

4.3 Geología del subsuelo

La geología del área de Tequila está constituida por rocas volcánicas producto de la actividad del volcán del mismo nombre, de composición principalmente riolítica y en menor proporción rocas dacíticas-basálticas. Las dacitas afloran en la región centro-norte, separadas de las rocas riolíticas por una falla geológica de dirección NW-SE, seccionada en dos partes, y al SE están limitadas por una por otra falla con dirección opuesta. El tercer tipo de rocas extrusivas está representado por materiales piroclásticos, que rellenan las zonas topográficamente más bajas, conformados por tefra o lapilli de composición basáltica.

De acuerdo con la información disponible, es posible definir que el subsuelo en el área se encuentra conformado por tobas riolíticas, de edad Cretácico Superior–Paleógeno–Neógeno (Oligoceno–Mioceno), fracturadas, con permeabilidad secundaria, espesor aproximado 400 m; ignimbritas de composición riolítica, de edad Oligoceno–Mioceno, poco permeables, con espesor aproximado de 300 m; lavas, brechas y escorias de



La información geológica, geofísica e hidrogeológica, permite establecer la presencia de un acuífero de **tipo libre**, con condiciones locales de **semiconfinamiento** debido a la presencia de depósitos clásticos que funcionan como acuitardo; heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical. Está constituido, en su porción superior, por materiales piroclásticos representados por brechas volcánicas, tobas arenosas, tobas de lapilli y suelos residuales, cuyo espesor reducido (de 10 a 50 m) solo permite su explotación mediante norias y perforaciones someras que presentan niveles estáticos menores de 30 m. Esta es la unidad que se explota localmente para satisfacer los usos menores. La porción inferior está alojada en rocas de composición basáltica-andesítica (lavas, brechas y escorias) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, Representan la unidad de mayor explotación regional, mediante pozos perforados a profundidades de 100 a 250 m, en los que el nivel estático se presenta a una profundidad promedio de 60 m.

Como parte de los estudios realizados en 2010 y 2020, se ejecutaron 12 pruebas de bombeo de corta duración, etapa de abatimiento y/o recuperación, 5 pruebas en 2010 y 7 en 2020.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **1.69×10^{-4} a $1.02 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de $2.21 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **2.3×10^{-7} a $1.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$** con un valor promedio de $8.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios realizados en 2010 y 2020.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la profundidad al nivel del agua subterránea, el año 2020 presentó valores que variaron de 20 a 160 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona central de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. Los niveles estáticos más someros, menores de 40 m, se registran en la zona urbana de la ciudad de Tequila, asociados a niveles someros que presentan la unidad superior, incrementándose gradualmente hacia el sur y oeste, en dirección del poblado Santa Teresa y hacia la localidad Huitzilapan.

En la zona de Hostotipaquillo, los niveles del agua subterránea varían de 50 a 100 m, incrementándose desde la zona cercana al cañón del río Santiago, entre Cinco Minas y Hostotipaquillo, hacia el suroeste, entre las localidades San Simón, El Tequesquite, Las Ciénegas y La Montaña (figura 4).

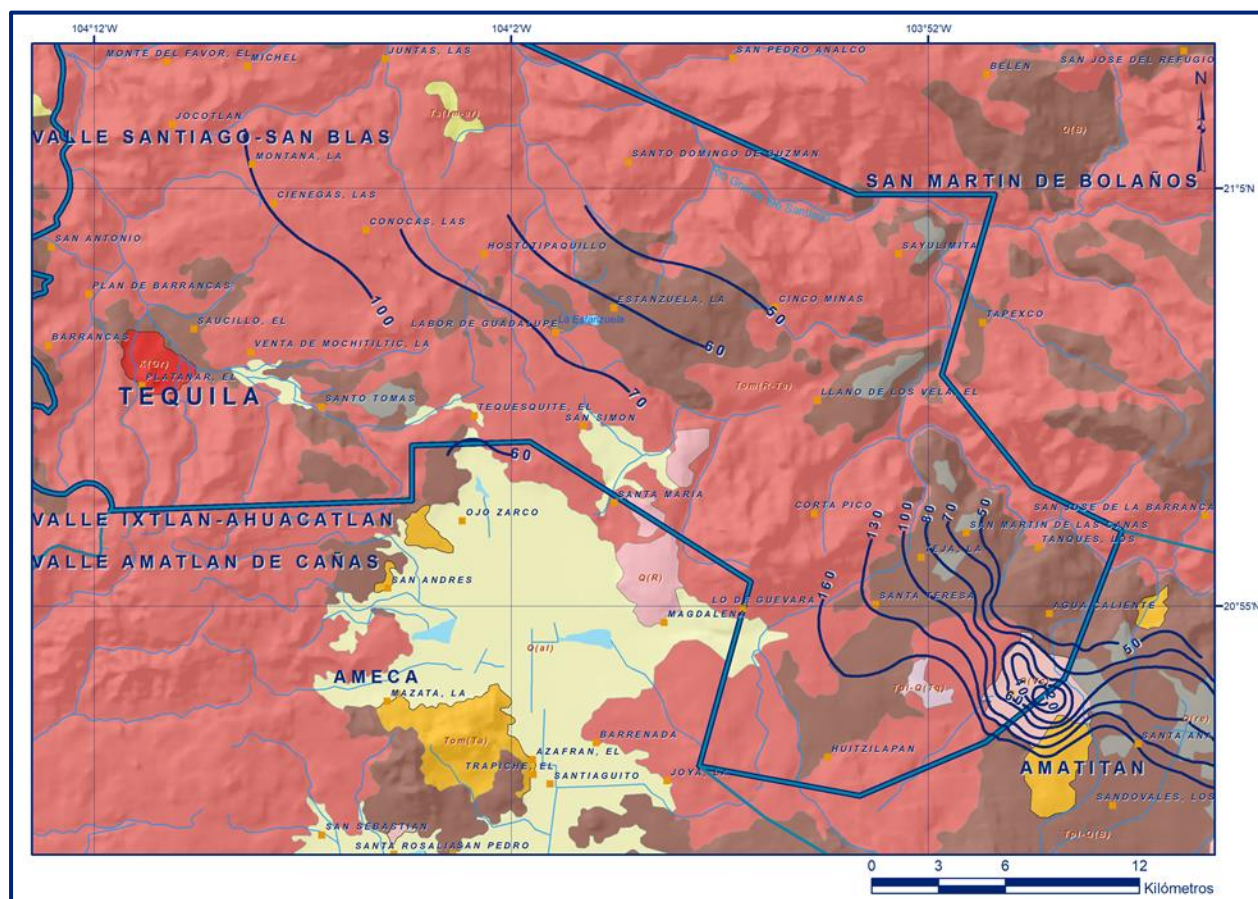


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2020)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2020 registró valores que variaron de 1110 a 1320msnm.

Las menores elevaciones, de 1110 a 1190 msnm, se registran en la región suroriental del acuífero, en la zona de Tequila en dirección a los poblados La Culebra y San Martín de las Cañas, hacia la barranca del río Santiago. En la zona de Hostotipaquillo varían de 1180 a 1320 msnm, desde la zona comprendida entre las localidades La Montana, Santo Domingo de Guzmán, Cinco Minas y El Llano de los Vela, hacia la región ubicada entre los poblados Las Ciénegas, Labor de Guadalupe, El Tequesquite y San Simón.

De esta manera, se identifica que la dirección preferencial del flujo subterráneo es suroeste-noreste en la zona de Tequila, sur-norte y sureste-noroeste en la zona de Hostotipaquillo. En ambas zonas, hacia la barranca del río Santiago (figura 5).

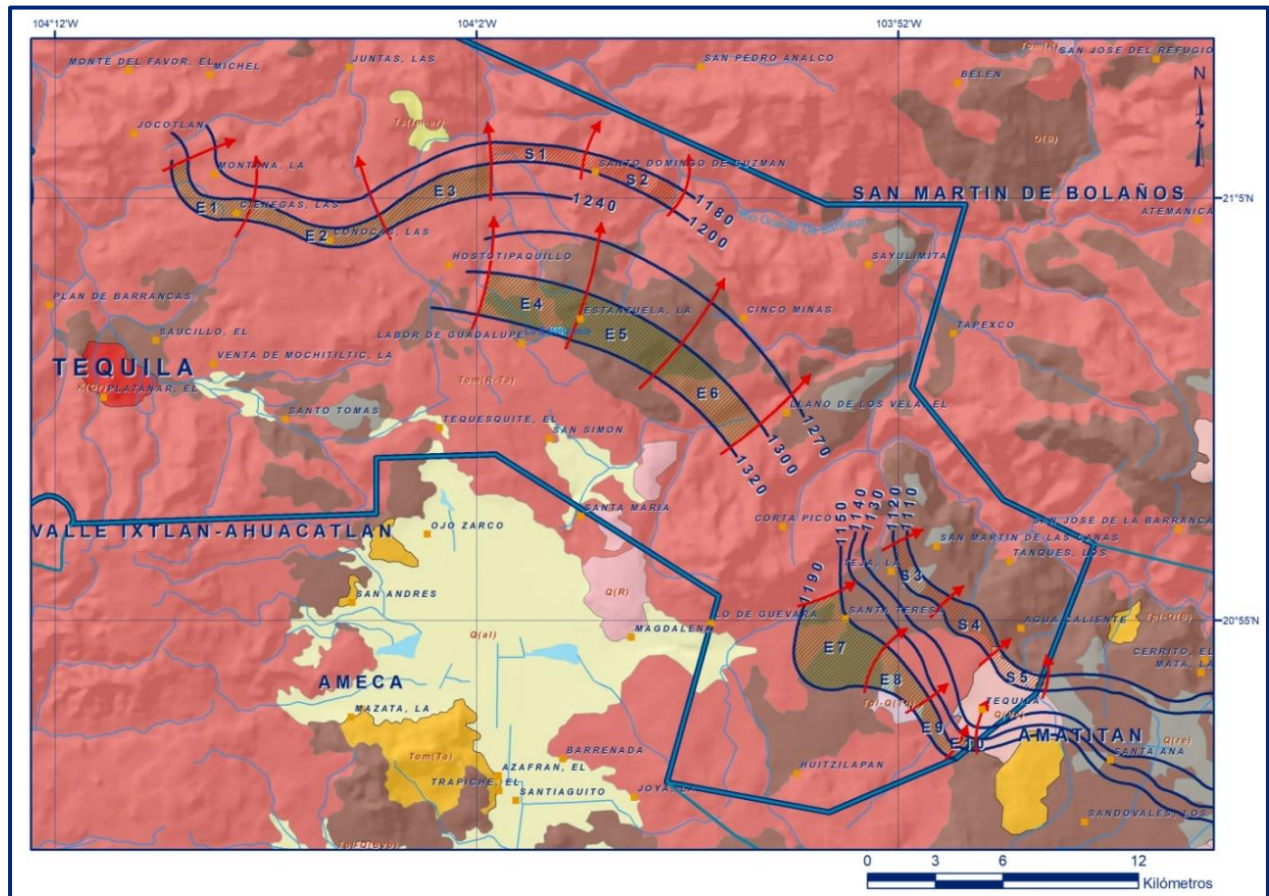


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2020)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2020 registró valores locales de abatimiento que varían de 1.0a 3.0 m, que representan 0.1 a 0.3m anuales, con valores locales de hasta 6.0 m (0.6 m/año), que se registraron únicamente en la zona de Tequila.

De manera general, en la mayor parte de la superficie de explotación del acuífero, no se registraron variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Los resultados indican que la calidad química del agua es apta para todo uso. Las concentraciones de SDT fluctúan entre 149 y 273 miligramos por litro (mg/l), muy por debajo de los 1000 mg/l que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, para el agua destinada al consumo humano.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de manera general, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que se registraron valores inferiores a $2000 \mu S/cm$; con valores extremos de 125 y $276 \mu S/cm$. Las temperaturas del agua subterránea registradas varían de 25.2 a 43.0 °C y el pH varía de 6.4 a 9.6.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las familias de agua que predominan es la bicarbonatada cálcica y la bicarbonatada sódica, que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua de los pozos se clasifica como C_1S_1 , con bajo contenido de sales y de sodio intercambiable (bajo índice de adsorción y peligrosidad de sodio, con reducido riesgo de salinidad), que puede utilizarse para riego en cualquier tipo de cultivo y suelo.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2020, se registró la existencia de 49 aprovechamientos del agua subterránea, todos ellos activos, de los cuales 36 son pozos, 2 norias y 11 manantiales.

El volumen de extracción calculado es de a **9.5 hm³ anuales**, de los cuales 7.5 hm³ (78.9 %) se destinan al uso público-urbano para el abastecimiento de agua potable a las localidades de la región, 1.7 hm³ (17.9 %) para uso industrial, 0.2 hm³ (2.1 %) para uso agrícola 0.1 (1.1%) hm³ para servicios.

Adicionalmente, a través de 11 manantiales se descarga un caudal de 73 lps, que representan un volumen de **2.3 hm³ anuales**, destinados principalmente para usos múltiples.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2020, en una superficie de **191 km²** que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas

(descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia y por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

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

Para este caso, debido a que el volumen destinado al uso agrícola es muy pequeño, para fines del balance de agua subterránea sólo se considera la recarga incidental ocasionada por el uso público-urbano.

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:

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

Donde:

Eh= Entrada por flujo subterráneo horizontal;

Rv= Recarga vertical;

Ri= Recarga incidental;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

Dm= Descarga a través de manantiales;

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2020, mostrada en la figura 5. 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:

$$Q = B * i * T$$

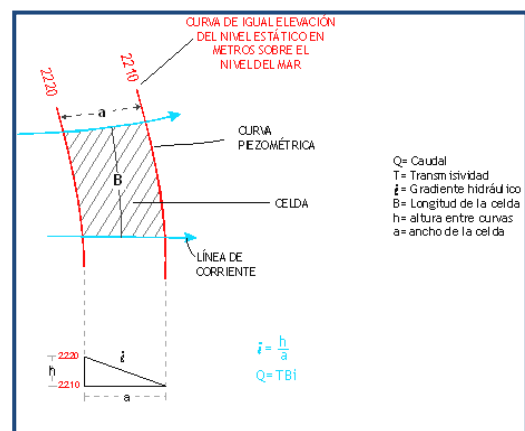
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m^2/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los

canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo es de **10.5 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2020)

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	4152	910	40	0.0440	0.00010	0.0183	0.6
E2	5860	809	40	0.0494	0.00010	0.0290	0.9
E3	4947	1272	40	0.0314	0.00010	0.0156	0.5
E4	4070	2115	20	0.0095	0.00010	0.0038	0.1
E5	4220	1995	20	0.0100	0.00010	0.0042	0.1
E6	4670	1695	20	0.0118	0.00010	0.0055	0.2
E7	4262	3144	40	0.0127	0.00030	0.0163	0.5
E8	2694	1220	40	0.0328	0.00100	0.0883	2.8
E9	2497	742	40	0.0539	0.00100	0.1346	4.2
E10	672	547	10	0.0183	0.00150	0.0184	0.6
TOTAL							10.5

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varían en función del estado físico y antigüedad de las líneas de conducción, así como de la eficiencia en el sistema de abastecimiento. Para el caso de este acuífero, se considera que, del volumen para uso público-urbano, el 30 % recarga de manera efectiva al acuífero. Si el volumen que se utiliza para uso público-urbano es de 7.5hm³ anuales, la recarga por esta fuente es de 2.3 hm³ anuales. Por lo tanto, la recarga incidental **Ri = 2.3 hm³/año**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por la descarga de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **9.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2020, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **4.6 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal (2020)

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	3790	782	20	0.0256	0.0001	0.0097	0.3
S2	4380	893	20	0.0224	0.0001	0.0098	0.3
S3	3460	793	10	0.0126	0.0012	0.0524	1.7
S4	3050	1220	10	0.0082	0.0012	0.0300	0.9
S5	2715	752	10	0.0133	0.0012	0.0433	1.4
TOTAL							4.6

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 11 manantiales importantes, que descargan en conjunto un caudal de 73 lps, que equivalen a volumen de 2.3 hm^3 anuales. Por lo tanto, **Dm = 2.3 hm^3 anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento(ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2020 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.06$, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -7.5 hm^3 , es decir, un promedio anual de -0.8 hm^3 .

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2010-2020)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-6	-6	1.4	0.06	-0.5
-3 a -6	-4.5	13.2	0.06	-3.6
-2 a -3	-2.5	15.4	0.06	-2.3
0 a -2	-1.0	17.7	0.06	-1.1
	TOTAL	47.7	TOTAL	-7.5
	Promedio anual			-0.8

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = S_h + B + D_m - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

$$R_v = 4.6 + 9.5 + 2.3 - 10.5 - 2.3 - 0.8$$

$$R_v = 2.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total es la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 2.8 + 10.5 + 2.3$$

$$R = 15.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R: Recarga total media anual

DNC: Descarga natural comprometida

VEAS: Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **15.6 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Amatitán, su valor es **6.9 hm³ anuales**, de los cuales 4.6 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia la barranca del río Santiago y 2.3 hm³ a la descarga del manantial que está comprometidos para uso agrícola. **DNC = 6.9 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **16'612,428 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 15.6 - 6.9 - 16.612428 \\ \text{DMA} &= -7.912428 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **7'912,428 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Casa Cuervo. S.A. de C.V. 2020. Actualización hidrogeológica del acuífero Tequila (1437), estado de Jalisco. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio de actualización geohidrológica de los acuíferos Valle de Guadalupe, Cuquío, Tequila, Jalostotitlán y Colotlán en el estado de Jalisco. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Servicio Geológico Mexicano, 2006. Carta Geológico-Minera Hostotipaquillo F14-A72. Escala 1:50,000.