



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ALTOS DE JALISCO (1413), ESTADO DE
JALISCO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1. Provincias Fisiográficas.....	7
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA	10
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología Estructural.....	12
4.3. Geología del Subsuelo.....	12
5. HIDROGEOLOGÍA.....	13
5.1. Tipo de acuífero.....	13
5.2. Parámetros hidráulicos.....	15
5.3. Piezometría.....	16
5.4. Comportamiento Hidráulico.....	16
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	18
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1. Entradas.....	21
7.1.1. Recarga vertical.....	21
7.1.2. Recarga inducida.....	24
7.1.3. Entrada horizontal por flujo subterráneo.....	24
7.2. Salidas.....	25
7.2.1. Evapotranspiración.....	25
7.2.2. Descargas naturales.....	25
7.2.3. Bombeo.....	25
7.2.4. Flujo subterráneo horizontal.....	25
8. DISPONIBILIDAD	26
8.1. Recarga total media anual (R).....	27
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	27
9. BIBLIOGRAFÍA	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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 Altos de Jalisco, definido con la clave 1413 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al noreste de la capital del estado de Jalisco, en la denominada puerta a la región Altos de Jalisco, entre los paralelos 20° 27' y 21° 10' de latitud norte y los meridianos 102° 35' y 103° 17' de longitud oeste. Colinda al norte con los acuíferos Cuquio, Yahualica y Tepatitlán, al este con Valle de Guadalupe, al oeste con Atemajac y Toluquilla y al sur con los acuíferos Ocotlán, Poncitlán y Cajititlán, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco. Figura 1, cubre una superficie aproximada de 1,519 km² conforme a la poligonal que lo delimita.

El acuífero integra principalmente territorios de los municipios de Zapotlanejo, Tepatlán de Morelos y Acatic, y porciones territoriales menores de los municipios de Cuquío, Juanacatlán Zapotlán del Rey y una parte mínima de los municipios de Yahualica, Tototlán, Ixtlahuacán del Río y Guadalajara.

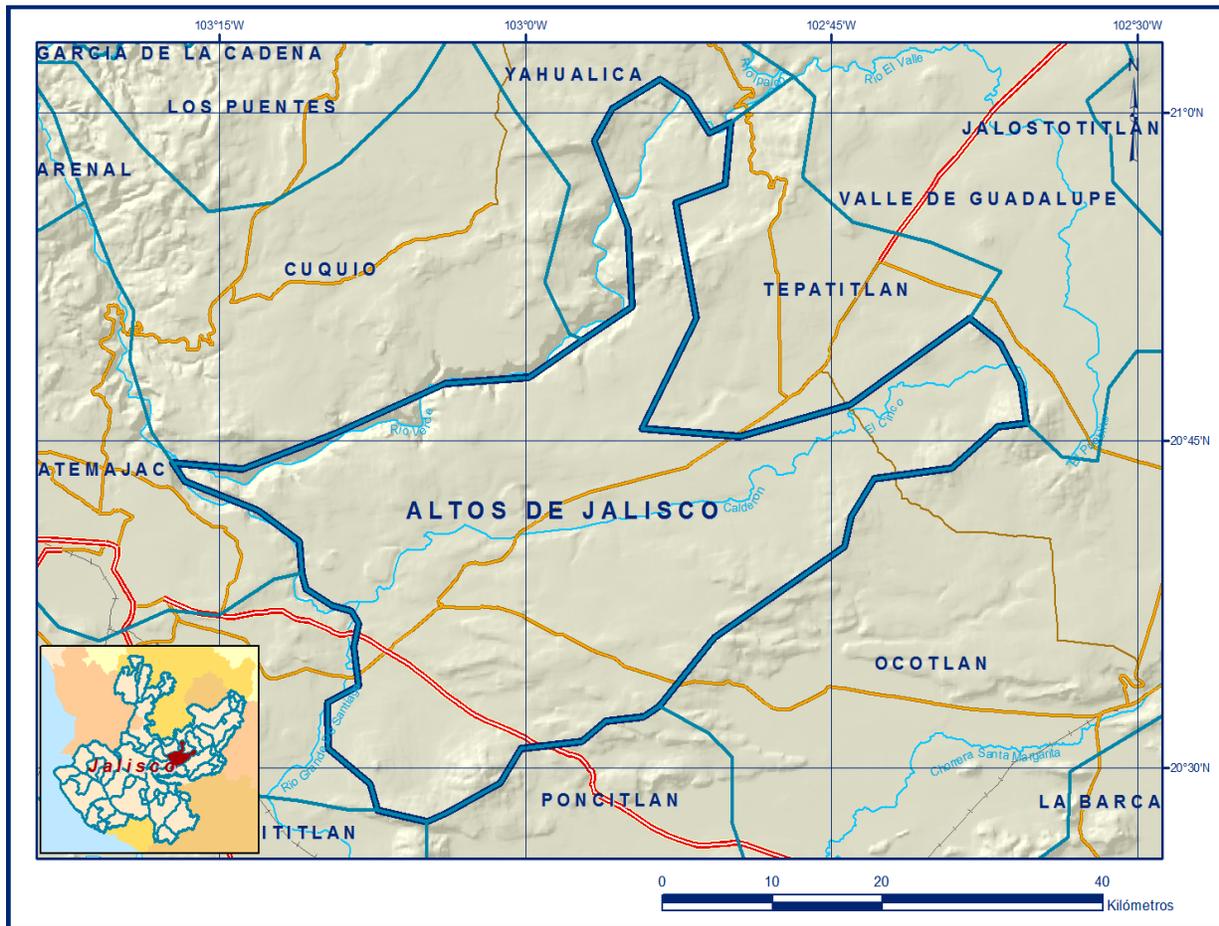


Figura 1. Localización del acuífero

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

Actualización de la Disponibilidad de agua en el acuífero Altos de Jalisco, estado de Jalisco.

ACUIFERO 1413 ALTOS DE JALISCO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	17	19.3	20	43	58.4
2	103	13	54.6	20	43	42.9
3	103	9	28.7	20	45	17.7
4	103	3	58.5	20	47	38.3
5	102	59	50.9	20	47	53.6
6	102	57	11.9	20	49	37.5
7	102	54	47.9	20	51	8.8
8	102	54	59.4	20	54	44.5
9	102	56	39.6	20	58	43.3
10	102	55	45.7	21	0	11.9
11	102	53	27.0	21	1	32.8
12	102	52	6.1	21	0	42.7
13	102	51	0.0	20	59	6.4
14	102	49	57.9	20	59	33.1
15	102	50	14.9	20	56	45.3
16	102	52	40.2	20	55	54.0
17	102	51	40.3	20	50	37.5
18	102	54	19.4	20	45	32.9
19	102	49	32.0	20	45	12.4
20	102	44	7.1	20	46	38.1
21	102	38	16.2	20	50	37.5
22	102	36	45.5	20	49	28.6
23	102	35	43.9	20	47	40.8
24	102	35	28.5	20	45	49.1
25	102	36	53.2	20	45	37.5
26	102	39	8.0	20	43	45.8
27	102	42	55.3	20	43	15.0
28	102	44	4.6	20	41	31.0
29	102	44	23.9	20	40	10.1
30	102	50	45.2	20	35	59.7
31	102	53	28.7	20	32	51.8
32	102	54	14.6	20	32	21.2
33	102	56	4.7	20	32	9.0
34	102	57	15.0	20	31	13.9
35	103	0	15.3	20	30	55.6
36	103	1	16.5	20	29	20.8
37	103	3	52.4	20	27	58.3
38	103	4	50.5	20	27	33.8
39	103	7	17.2	20	28	4.4
40	103	7	38.6	20	29	17.8
41	103	9	40.9	20	30	55.6
42	103	9	43.9	20	33	0.9
43	103	8	12.2	20	33	46.8
44	103	8	17.5	20	34	24.0
45	103	8	27.5	20	35	33.8
46	103	8	12.2	20	36	38.0
47	103	8	33.6	20	37	11.6
48	103	9	28.7	20	37	26.9
49	103	10	48.1	20	38	12.7
50	103	11	0.4	20	38	55.5
51	103	11	6.5	20	40	24.2
52	103	13	8.8	20	41	49.8
53	103	16	42.8	20	43	9.3
1	103	17	19.3	20	43	58.4

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto de veda tipo III “ *Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en zonas no vedadas de diversos Municipios del Estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 12 de julio de 1987, el cual permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El usuario principal es el público-urbano. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca (16) “Río Santiago”, instalado el 14 de julio de 1999. La parte sur del acuífero pertenece a la Comisión de Cuenca (16ª) “Río Calderón”, a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En una pequeña porción al sureste del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego denominado Estado de Jalisco.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

De 1981 al 2007, han sido diversos los estudios formales realizados en el acuífero o en áreas aledañas que lo incluyen, de carácter regional o local, a diferente nivel de detalle, con objetivos distintos. Existen además numerosos reportes sobre trabajos aislados de perforación de pozos los que integrados dentro del contexto de la cuenca constituyen información muy valiosa. Se citan los informes más importantes a continuación:

Servicio de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la zona de Acatic, Tepatitlán y Arandas, Jalisco. Geólogos Consultores, S.A., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981, cuyos principales objetivos fueron definir las condiciones hidrogeológicas y su relación con el funcionamiento de los acuíferos de la zona; localizar áreas con mayores posibilidades para el almacenamiento y explotación de aguas subterráneas. Señala que los depósitos residuales y aluviales de las zonas presentan poco espesor y buena permeabilidad.

Actualización del Estudio Geohidrológico de los valles de Tesistán- Atemajac-Ocotlán, Jal. 1981. Elaborado por Geocalli, S.A., mediante un contrato de la SARH. Este estudio aporta datos importantes de apoyo para el estudio sobre información piezométrica y referencias sobre la geología de la zona colindante al Acuífero Altos de Jalisco.

Estudio Geohidrológico de la zona de Tesistán- Atemajac, Estado de Jalisco. Ariel Construcciones, S.A. de C.V. 1989. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, reporte interno. Se tomó en cuenta como referencia y apoyo la información general del censo de aprovechamientos existentes, los estudios de prospección geofísica para investigación del acuífero a 500 m de profundidad para la conformación geológica.

Diagnóstico de las Condiciones Geohidrológicas actuales y análisis de Operación del acuífero de Atotonilco-Ocotlán, Jal. 1993. Elaborado por Ariel Consultores mediante contrato de la Comisión Nacional del Agua. Aporta información de las características hidrogeológicas de los valles de Atotonilco y Ocotlán, colindantes al Acuífero Altos de Jalisco en su perímetro sureste.

Diagnóstico de las Condiciones Geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación de los acuíferos de Arandas-Ayotlán y Ocotlán-Atotonilco, en Jal. 1995. Elaborado por Ariel Consultores mediante contrato del Gobierno del Estado de Jalisco. Aporta información geológica regional para el estudio Altos de Jalisco.

Actualización del Estudio Geohidrológico de la Zona Conurbada de Guadalajara, Jalisco. Geoex, S.A. de C.V. 1996. Estudio realizado para el Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). Aporta información importante sobre la geología y geohidrología de la porción sureste del acuífero Atemajac y de la porción noreste del acuífero Toluquilla.

Estudio de actualización geohidrológica integral de las cuencas Atemajac y Toluquilla. Realizado para el SIAPA en 2003 por la empresa GEOEX, S.A. de C.V., mediante contrato SIAPA CAOD-255/02. El estudio aporta información actualizada, importante para el estudio del Acuífero Altos de Jalisco, por su colindancia y regionalización sobre los siguientes aspectos.

Las relaciones y características petrológicas, petrogenéticas, estructurales e hidráulicas de las unidades estratigráficas mayores de la región. Definir un modelo conceptual de flujo hidrodinámico de los acuíferos. Presenta el comportamiento piezométrico y la evolución de los niveles, establece las áreas de recarga y descarga, así como la dirección de flujo del agua subterránea.

Exploraciones Geológicas, Geofísicas y Evaluaciones Geohidrológicas regionales y locales implementadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en los Altos de Jalisco. Documentos de suma importancia y gran utilidad para establecer el medio geológico, geomorfológico y estructural de la región y del Acuífero Altos de Jalisco.

Estudio Geohidrológico del acuífero Altos de Jalisco, en el Estado de Jalisco.

Realizado en el año 2007 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Los resultados del cálculo de la disponibilidad indican que se tiene un valor positivo de 36.5 hm³/año, con una recarga total del orden de 61.9 hm³/año, una descarga natural comprometida de 0.6 hm³/año y un volumen concesionado anual de 24.733931 hm³/año. La determinación del valor de la recarga vertical Rv con el estudio hídrico superficial y el análisis de sensibilidad del volumen infiltrado a partir de la metodología establecida en la NOM-011-CONAGUA-2000, se considera un tanto conservadora, ya que representa el 3.75 % del volumen llovido como infiltración y recarga al acuífero. El valor de **Rv= 48.11 hm³/año**. 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.

Elaboración de los documentos de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos (1413) Altos de Jalisco, (1436) Arenal, (1428) Chapala, (1429) Tizapán y (1447) Yahualica, en el estado de Jalisco. 2007. Realizados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para la CNA.

El objetivo fue contar con los documentos técnicos de respaldo que sirvan de consulta rápida para conocer la disponibilidad media anual de agua del Acuífero (1413) Altos de Jalisco, del Estado de Jalisco, ajustándose a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.

Algunos resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias Fisiográficas

El acuífero Altos de Jalisco, según INEGI (1991), se localiza en el sector nor-occidental de la provincia fisiográfica Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), muy cerca de la frontera sur y sureste de las provincias fisiográficas Meseta Central (MS) y Sierra Madre Occidental (SMO), respectivamente.

La FVTM se caracteriza por una serie de planicies escalonadas delimitadas por fallas, estructuras y aparatos volcánicos. Cinturón volcánico que atraviesa a la República Mexicana en dirección casi este – oeste, a lo largo del paralelo 19° 30' con una extensión aproximada de 980 km desde las cercanías de las costas de Colima, Jalisco y Nayarit en el occidente, hasta las costas de Veracruz en el oriente.

La zona se sitúa al NE del estado en la transición entre las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico y Mesa Central. La Geología de la zona está compuesta principalmente por rocas ígneas extrusivas ácidas del Neógeno, arenisca asociada a conglomerado de esta misma época; rocas ígneas extrusivas básicas del Neógeno-Cuaternario y suelo aluvial y residual del Cuaternario.

Cortes litológicos de pozos seleccionados muestran que el acuífero se encuentra en rocas de basalto sano, basalto alterado, y basalto fracturado, brecha volcánica, alternando con paquetes de arena y aglomerado; presenta también horizontes de arcilla en las partes superiores que hacen suponer estratos confinantes.

3.2. Clima

El clima se caracteriza por dos tipos: (ACw) y C (w) que corresponden a un clima semicálido subhúmedo y templado subhúmedo. De acuerdo a la información de las tres estaciones climatológicas localizadas dentro de los límites de acuífero (Palo Verde, Zapotlanejo y La Red), la temperatura media anual es de 18.5° C, la precipitación media anual resulto de 898.9 mm.

La evaporación potencial media anual es del orden de 2170 mm; con una variación anual que va de 1,461 mm a los 2,514 mm, el mes con mayor índice de evaporación media es mayo, y el de menor evaporación corresponde a diciembre.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 12. Lerma Santiago, situado entre la margen derecha del río Santiago e izquierda del río Verde, cuyos cauces lo delimitan por sus lados N-NE y N-NW, respectivamente. Los principales afluentes dentro del acuífero lo constituyen las subcuencas de los ríos Calderón y Zapotlanejo.

La subcuenca del Río Calderón tiene su origen en la falda norte del cerro Gordo de Tepatitlán, a una altitud de 2650 msnm, nace con el nombre de arroyo El Cinco que transita hacia el norte en aproximadamente sus primeros cinco kilómetros, en los que desciende a la elevación 2050 msnm, para luego encauzarse al suroeste con el

nombre de arroyo del Sabino, a lo largo de su avance recibe, los arroyos tributarios conocidos como: arroyo Juanacasc, por su margen derecha y por margen izquierda los arroyos Ahuacate y El Ocotillo, descargando al final de este primer tramo sus escurrimientos en la presa La Red ya con el nombre de Río Calderón.

A la salida de la presa La Red, su cauce principal se orienta con dirección poniente donde capta por margen izquierda los arroyos La China, El Capulín, Rancho Viejo y Tecomán; y por margen derecha aguas arriba del puente de la carretera federal No. 80 recibe el arroyo La Joya. Aguas abajo del puente por la misma margen le confluyen los arroyos San Agustín, La Ceja, y Lagunillas a la altura de la localidad de Tinajeros. Aguas abajo de este sitio el río Calderón se desarrolla en un patrón de drenaje reticular siguiendo zonas de debilidad por fracturamiento en dos direcciones perpendiculares, incrementado su pendiente media al descender de la elevación 1,518 msnm, en el sitio Tinajeros hasta la elevación 1,340 msnm en su confluencia por la margen derecha del colector principal de la cuenca del río Santiago. Su desembocadura en el Santiago ocurre cerca de la Zona metropolitana de Guadalajara, a escasos 5 km al NE de Tonalá.

El río Zapotlanejo nace al este de la población del mismo nombre, su origen es en las faldas de la serranía NE de la misma, continua en una dirección Este – Oeste, hasta atravesar la cabecera municipal de Zapotlanejo, para proseguir en dirección Noreste hasta casi su confluencia con el río Santiago. Tiene una longitud de aproximadamente 33 km, por su cauce principal y el área de su cuenca es de 126 km² totalmente agregados en el polígono delimitante del acuífero Altos de Jalisco.

3.4. Geomorfología

La estructura orográfica de estas cuencas se desarrolla, en general, hacia el parteaguas oriental de la Sierra Madre Occidental, con las características de cuencas internas. Comprende zonas semiplanas, conformadas por áreas planas y accidentadas en proporciones parecidas. La principal altura es del cerro Gordo de Tepatitlán, que se localiza al oriente de esa cabecera, con una altura de 2,667 msnm. Su porción central es un amplio corredor con alturas entre 1,500 y 1,700 msnm. Las alturas inferiores a 1,500 msnm se encuentran formando las barrancas por donde fluyen los ríos Verde y Santiago.

El relieve y las topoformas del área son dominados por rasgos geológicos y geomorfológicos de origen volcánico y tectónico; donde el conjunto de mesetas lávicas escalonadas están formadas por rocas de composición basáltica, geofomas presentes en la porción central del área con alturas de 1,900 a 2,300 msnm, los

profundos cañones de los ríos Verde, al noroeste, y río Grande de Santiago, al suroeste, y el sistema de fallamiento normal este – oeste del Graben de Chapala al sur, representan los rasgos geomorfológicos más notables de este sector de la FVTM.

4. GEOLOGÍA

El área del acuífero en particular, se localiza muy próxima al sur de la frontera entre las provincias fisiográficas de la FVTM y la Sierra Madre Occidental (SMO). En el reciente estudio cartográfico y radiométrico realizado por Rossotti *et al.* (2002) al norte del área, en la frontera de ambas provincias fisiográficas, se estableció que la estructura de la transición entre la SMO y la FVTM no está bien ubicada ni entendida, sin embargo, las rocas volcánicas de la SMO que afloran a una elevación de 2,100 msnm en el área de García de La Cadena, están constituidas por una secuencia de ignimbritas de edad Mioceno Temprano y coronadas hacia el sur por una secuencia de basaltos fechados por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 21.8 ± 0.3 Ma, unidades que se presentan subhorizontales al norte de García de la Cadena, inclinándose hasta 25° al sur de esta población, donde son cubiertas discordantemente por el volcanismo de la FVTM. Figura 2.

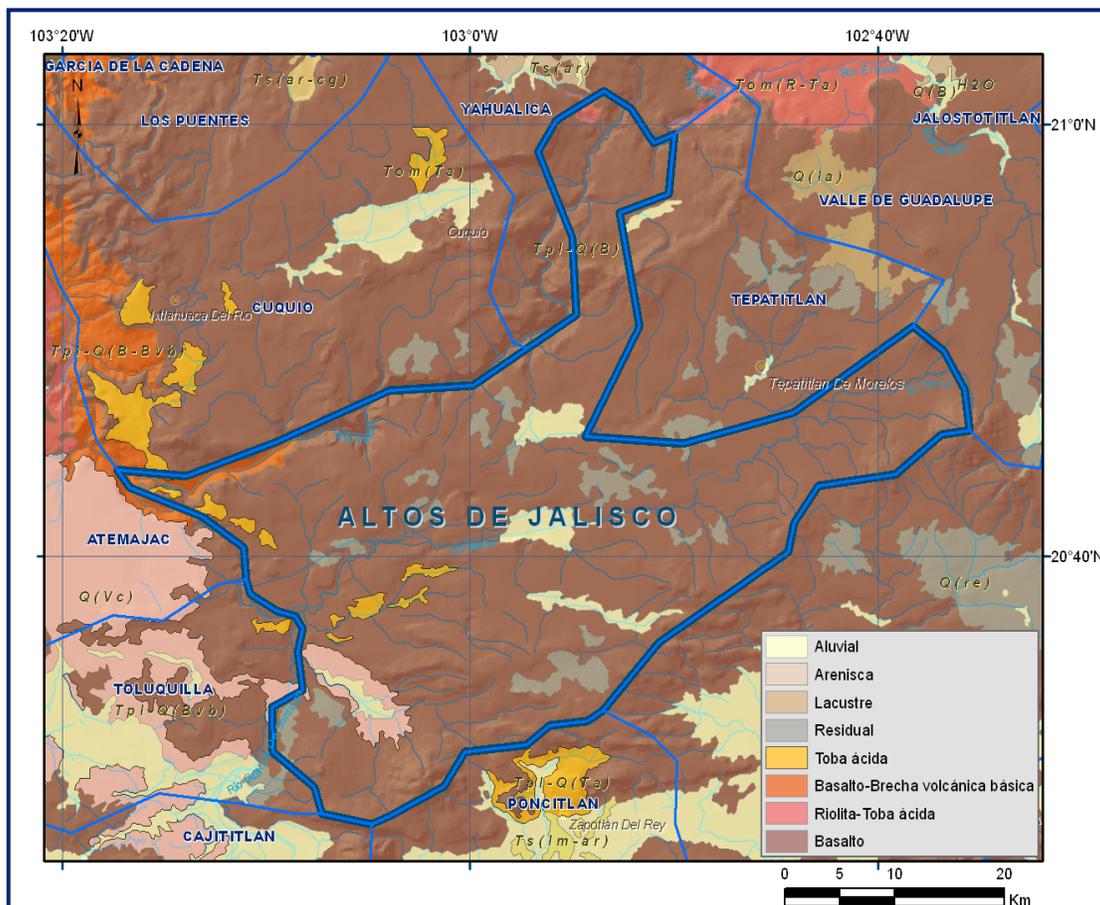


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

El contexto geológico y estratigráfico de la zona está basado en la bibliografía disponible, interpretación de la imagen de satélite, descripciones litológicas - registros eléctricos de pozos, tomando como referencia la sucesión volcánica documentada en la ZMG y áreas adyacentes, así como la columna estratigráfica identificada en el pozo geotérmico PR-9.

Las unidades estratigráficas mayores se citan a continuación.

Tmrs (B-A) Grupo Río Santiago. Mioceno Tardío. (11.0 – 7.5 Ma).- Derrames de basalto y andesita basáltica, con intercalaciones menores de tobas soldadas hacia la base y flujos de ceniza y lapilli pumicítico en la cima.

Qre. Depósitos residuales y suelo.- Acumulaciones de hasta 3 m de arcillas, arenas y fragmentos de roca producto del intemperismo y/o degradación de la roca subyacente. Depósitos localmente subyacidos por las rocas del Grupo Río Santiago (TmrsB-A) y/o los materiales piroclásticos de la Toba Tala (QptTT).

Qpt (TT) Toba Tala. Pleistoceno (0.095 Ma).- Toba silíceo. Material piroclástico normalmente no consolidado e integrado por tobas de caída libre, lapilli y flujos de ceniza con abundantes fragmentos de pumicita, menor vidrio volcánico y ocasionales bloques.

Basalto San Cristóbal (11.0 a 8.5 Ma). - Esta sucesión basáltica constituye el principal cuerpo del Grupo Río Santiago y está bien expuesto en el cañón del río Santiago desde una altura de 900 hasta 1,800 msnm. La base no está bien expuesta y el máximo espesor observable es de 800 m.

Toba San Cristóbal (10.17 Ma).- El nombre de toba San Cristóbal se ha dado a una secuencia de ignimbritas de 2 a 8 m de espesor, unidad intercalada y con marcado contacto con la sección inferior del basalto San Cristóbal.

Toba Los Caballos.- Esta unidad aflora dentro de los 100 m superiores de los basaltos San Cristóbal y es principalmente observada al norte del río Santiago, al NW del poblado de San Cristóbal.

Basalto Arroyo Mezcala (7.5 Ma).- La parte superior del Grupo Río Santiago, está representada por una secuencia masiva de basalto que forma pequeños y parcialmente expuesto molde de lava al norte de Tesistán, en el arroyo Mezcala.

Hacia el este de Guadalajara, en la región de Los Altos de Jalisco, los basaltos expuestos en el río Grande de Santiago aparecen en una meseta de 130 km de largo por 60 km de ancho, con una elevación media de 1900 msnm.

Qpt (TT) Toba Tala.- La Toba Tala representa a los materiales piroclásticos más superficiales que ocurren en una amplia área (~1,200 km²) alrededor de la caldera de La Primavera y por tanto, cubren la mayor parte de las depresiones topográfico-estructurales y valles del área. La estratigrafía regional para la porción de Tepatitlán, se encuentra constituida por rocas sedimentarias continentales e ígneas extrusivas que abarcan una edad del Mioceno al Reciente.

4.2. Geología Estructural

El marco tectónico-estructural que se observa en el área está relacionado a un vulcanismo de tipo riolítico principalmente que da inicio a finales del Eoceno, y que produjo la presencia de ignimbritas, tobas y brechas riolíticas. Durante esta fase y de manera más o menos simultánea, se desarrolló una gran actividad tectónica, básicamente un fallamiento de tipo distensivo, que dio origen a grandes bloques delimitados por fallas normales que, en la región donde queda involucrada el área del acuífero, presentan una orientación general NNE-SSW, originándose de esta manera “fosas” o “cuencas” de dimensiones considerables, originadas a finales del Mioceno.

Las fallas mayores originadas por la tectónica descrita, produjeron sistemas locales de fallamiento y fracturamiento, como es el caso de los sistemas conjugados, que se pueden detectar y medir en las rocas que afloran en el área.

Las estructuras principales son los conos volcánicos y domos que se encuentran cubriendo toda la región.

4.3. Geología del Subsuelo

De la consulta de algunos cortes litológicos de pozos perforados en el área se desprende que la mayor parte de ellos presenta un paquete superior de materiales sedimentarios, arcillas y tobas, con espesores reducidos que van de 20 a 50 m, descansan sobre rocas basálticas con diferentes espesores.

Los de tipo basáltico de la parte inferior, aunque tienen composición similar, no tienen las mismas características de alteración y grado de fracturamiento, alternando capas de basalto sano compacto e impermeable, pues según lo investigado, no todos los pozos fueron productores cuando cortaron basaltos. Figura 3.

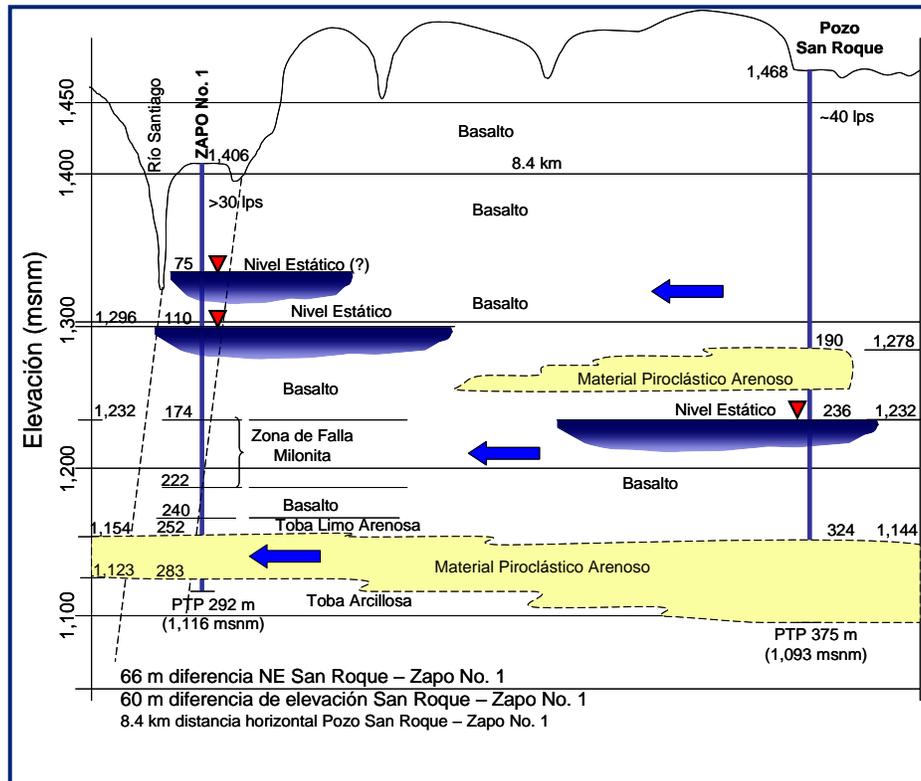


Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Se trata de un sistema acuífero compuesto por varias unidades hidrogeológicas que se agrupan de acuerdo a su origen en dos grupos principales; por una parte, las unidades superiores son intercalaciones de arenas, clásticos y limos, que en algunos pozos se interdigitan con limos y arcillas o aglomerados, en matriz arcillosa, lo que sugiere algún grado de confinamiento pero que en general tiende a conformar un sistema libre.

Por otra parte existen unidades hidrogeológicas de escoria basáltica, basaltos fracturados y/o alterados que subyacen a las unidades anteriores y que al tener zonas de recarga muy lejanas, tienen un comportamiento de tipo semiconfinado.

Con la información geológica, cortes litológicos de pozos, piezometría e interpretación de las pruebas de bombeo fue posible establecer el funcionamiento hidrogeológico en tres unidades hidrogeológicas que siguen un patrón de flujo subterráneo en dirección general paralela a la(s) corriente(s) superficial(es) que drenan las subcuencas de los ríos Calderón, Verde y Zapotlanejo-La Laja.

Se considera que la recarga principal se origina en los depósitos de pie de monte asociados a las serranías localizadas en los parteaguas de las cuencas del Calderón y Zapotlanejo, se descarta como área de recarga las zonas de cañadas afluentes tanto del río Verde como del Santiago, debido a sus características de profundidad y pendiente que presentan.

La Unidad Hidrogeológica Río Verde, con niveles estáticos del orden de los 150 m, localizados al centro sur de la subcuenca, en las colindancias con la unidad hidrogeológica Río Calderón.

Con la configuración de las curvas equipotenciales, apoyada en los pozos cercanos de las unidades hidrogeológicas colindantes (Río Calderón y Tepatitlán) situados al sur y sureste respectivamente, se induce que el flujo subterráneo tiene dirección sur, hacia la unidad hidrogeológica Río Calderón. El tipo de acuífero de esta unidad se considera semiconfinado.

Unidad Hidrogeológica Río Calderón, presenta un paquete superior de materiales sedimentarios arcillas y tobas con espesores reducidos que varían de los 20 a los 50 m y descansan sobre rocas basálticas de hasta 300 m de espesor, con diferentes grados de fracturamiento, alternadas con capas de basalto sano compacto e impermeable y, por lo tanto, con diferente comportamiento hidrogeológico; considerándose como un acuífero semiconfinado en la zona más cercanas al río y confinado en las zonas altas de la cuenca.

El espesor con presencia de aportación es variable, considerando en promedio 150 m. Su permeabilidad se considera media.

En esta unidad se tiene información hidrogeológica aceptable que permite determinar el comportamiento hidrogeológico del acuífero, sus niveles son del orden de los 50 a 200 m de profundidad, hasta de 290 m.

Con el apoyo de los niveles estáticos de pozos vecinos pertenecientes al acuífero Tepatitlán, se logró configurar las curvas equipotenciales, apoyados en las condiciones de frontera de carga constante y considerando además que las formaciones geológicas en las fronteras de este acuífero con Altos de Jalisco son basaltos fracturados y alterados, permite asumir que la recarga por flujo horizontal de este último acuífero corresponde a las salidas por flujo horizontal del primero, configurándose cuatro canales de flujo, como se observa en la figura 5.

Unidad Hidrogeológica Zapotlanejo-La Laja.

Presenta un paquete superior de materiales sedimentarios arcillas y tobas con espesores muy reducidos que varían de los 10 a los 20 m en la mayor parte de la unidad, y entre 100 y 150 m de espesor al noreste de la población de Zapotlanejo, le subyacen las rocas basálticas en estratos sanos impermeables y con fracturas.

Los niveles piezométricos se encuentran entre los 50 y 100 m en la mayoría de los pozos. Por las características hidrogeológicas de esta unidad se puede clasificar el acuífero de tipo semiconfinado en zonas topográficas más bajas y confinado en las zonas más altas.

El espesor con presencia de aportación varía entre 50 y 75 m, a diferentes profundidades, considerándose un acuífero fracturado semiconfinado.

Con la configuración de las curvas equipotenciales apoyada en los pozos cercanos de la unidad hidrogeológica colindante (Río Calderón) situado al noroeste, se induce que el flujo subterráneo tiene dirección noroeste, hacia el río Santiago, al cual tiende a descargar.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades realizadas en el estudio de 2007 del acuífero Altos de Jalisco, se realizaron pruebas de bombeo en etapas de abatimiento y recuperación que se practicaron en 6 pozos (Tabla 2): 2 pozos con prueba de abatimiento y recuperación (P100 Granjas y P 26 Coyotes), 2 pozos con prueba de abatimiento (P 77 La Purísima y P 82 Santa Fe); así como 2 pozos con prueba de recuperación (P 128 La Baraña 2 y P 129 La Mora), con los resultados siguientes.

Tabla 2. Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo

Calculo de transmisividades de los pozos con pruebas de recuperación.								
Pozo	Coordenada	Prof.	Espesor	Transmisividad de pruebas				
N° y Nom.	Lat. -- Long	Pozo	Saturado	Coeficiente	Q (m ³ /s)	s(m) recta	T (m ² /s)	T prom.
P 26-Coyotes	20° 34' 54'' 102° 55' 37''	150 m	100 m	0.183	0.018	18.75	0.00017568	
P 100-Las Granjas	20° 34' 45'' 102° 54' 20''	300 m	100 m	0.183	0.0028	0.512	0.001000781	
P 129-La Mora	20° 33' 24'' 103° 05' 46''	250 m	200 m	0.183	0.0188	7.42	0.000463666	
P 128- La Baraña 2	20° 35' 19'' 103° 06' 43''	150 m	100 m	0.183	0.00090	19.56	0.0000084	
								0.00041

Calculo de transmisividades de los pozos con pruebas de abatimiento.								
Pozo	Tipo Acuífero	Prof.	Espesor	Transmisividad de pruebas				
N° y Nom.	Lat. -- Long	Pozo	Saturado	Coeficiente	Q (m ³ /s)	s(m) recta	T (m ² /s)	T prom.
P 26-Coyotes	20° 34' 54'' 102° 55' 37''	150 m	100 m	0.183	0.018	15.68	0.000210077	
P 100-Las Granjas	20° 34' 45'' 102° 54' 20''	300 m	100 m	0.183	0.0028	0.4337	0.001181462	
P 82-Santa Fe	20° 30' 36'' 103° 05' 02''	150 m	100 m	0.183	0.011	4.286	0.0004696	
P 77-La Purísima	20° 44' 03'' 103° 07' 46''	300 m	100 m	0.183	0.008	8.57	0.0001708	0.0005074

El valor de la transmisividad que se asigna al acuífero es de **5.074 x 10⁻⁴ m²/s.**

5.3. Piezometría

Durante la realización del estudio de 2007, se efectuaron recorridos de campo entre los meses de junio-julio de 2007, para la medición de niveles del agua lo que permitió generar y disponer del registro de nivel estático (NE) en el acuífero.

5.4. Comportamiento Hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración piezométrica correspondiente al año 2007, los niveles del agua subterránea se encuentran a profundidades que varían de 50 a 100 m en la zona noreste, de 100 a 150 m en la zona central del acuífero y de 50 hasta 200 m en la zona suroeste, en las inmediaciones de las poblaciones de Zapotlanejo y La Laja. (Figura 4).

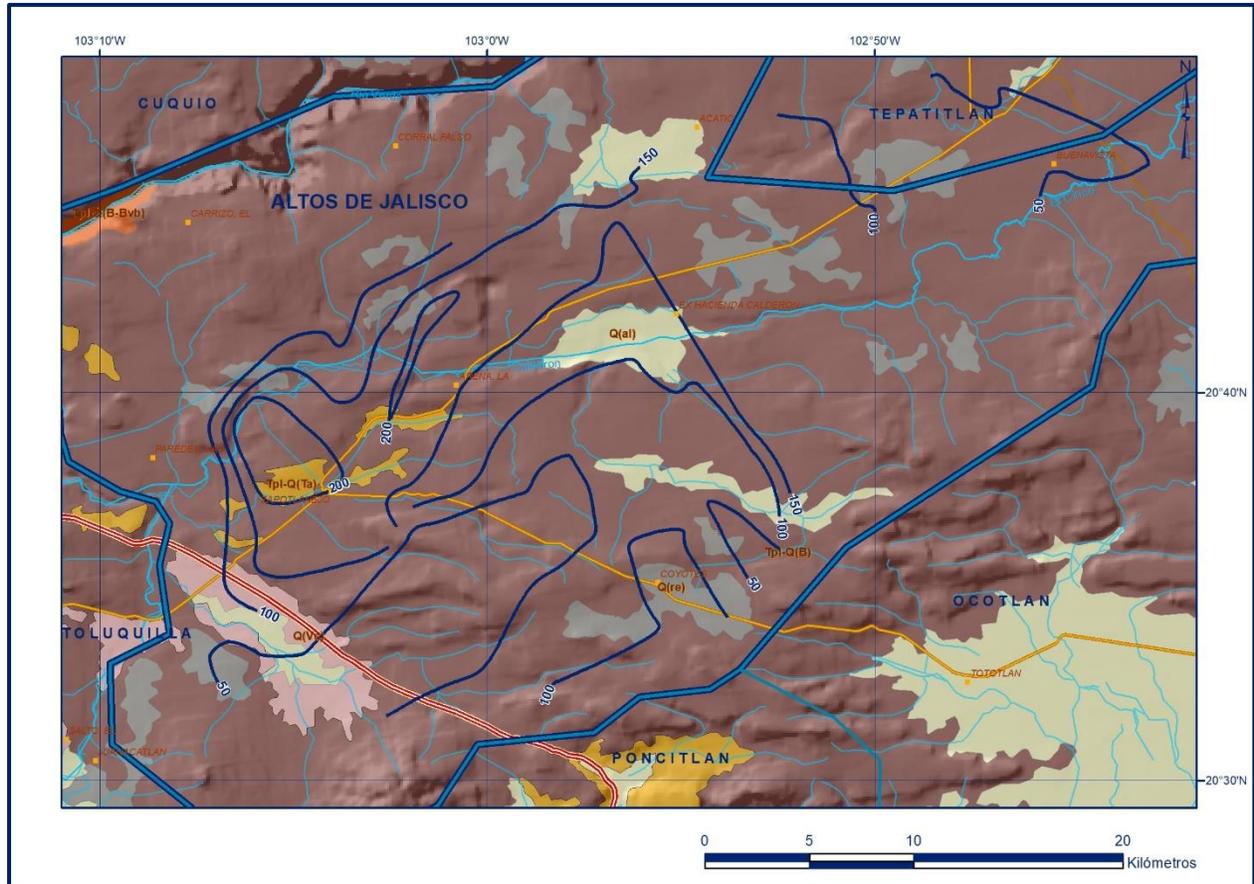


Figura 4. Profundidad al nivel estático (m) 2007

5.4.2. Elevación del nivel estático

En lo que respecta a la configuración de elevación del nivel estático (Figura 5), los valores en la zona noreste del acuífero son del orden de 1,850 msnm, varían de 1,700 a 1,550 msnm en la zona centro sur, y de 1,550 a 1,250 msnm al occidente, donde se localizan las poblaciones de Zapotlanejo y La Laja.

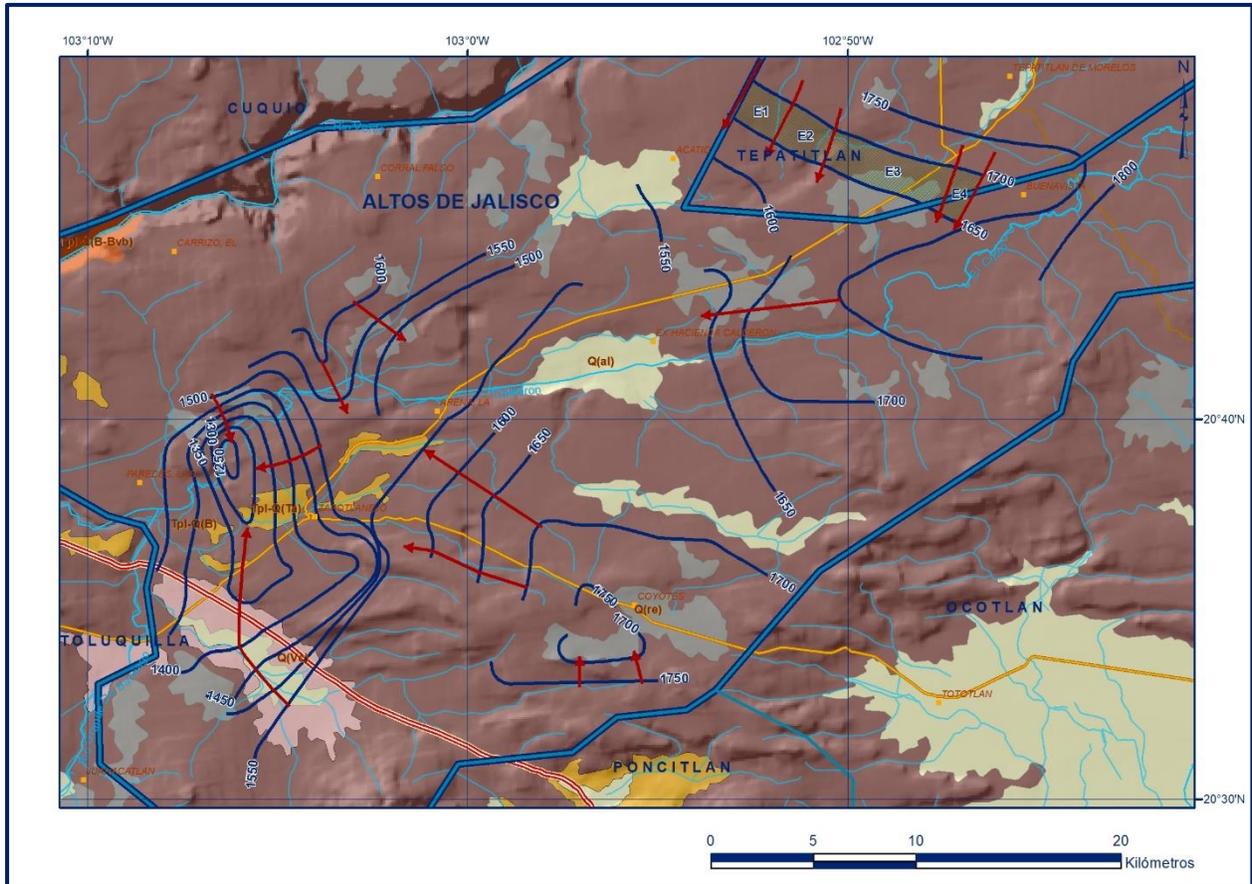


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2007). Canales de flujo del acuífero vecino Tepatitlán

El flujo subterráneo tiene dirección noreste suroeste y la recarga de agua subterránea procede de las partes montañosas.

Por la configuración de las curvas equipotenciales en la porción centro oriental del acuífero Altos de Jalisco y en la porción central sur del acuífero Tepatitlán, se establecen condiciones de frontera de carga constante entre ambos, ya que se tiene la presencia de algunos cuerpos de agua (presas) y el río Tepatitlán, estableciéndose un gradiente hidráulico continuo.

5.4.3. Evolución del nivel estático

No obstante, de disponer con poca información piezométrica, con la que existe fue posible determinar que en la porción centro del acuífero se presentan ascensos en el nivel estático, que son del orden de 1.0 m durante el periodo de octubre de 2006 a noviembre de 2007.

A partir de ello se puede asumir que existe un ascenso de los niveles del agua subterránea (Figura 6).

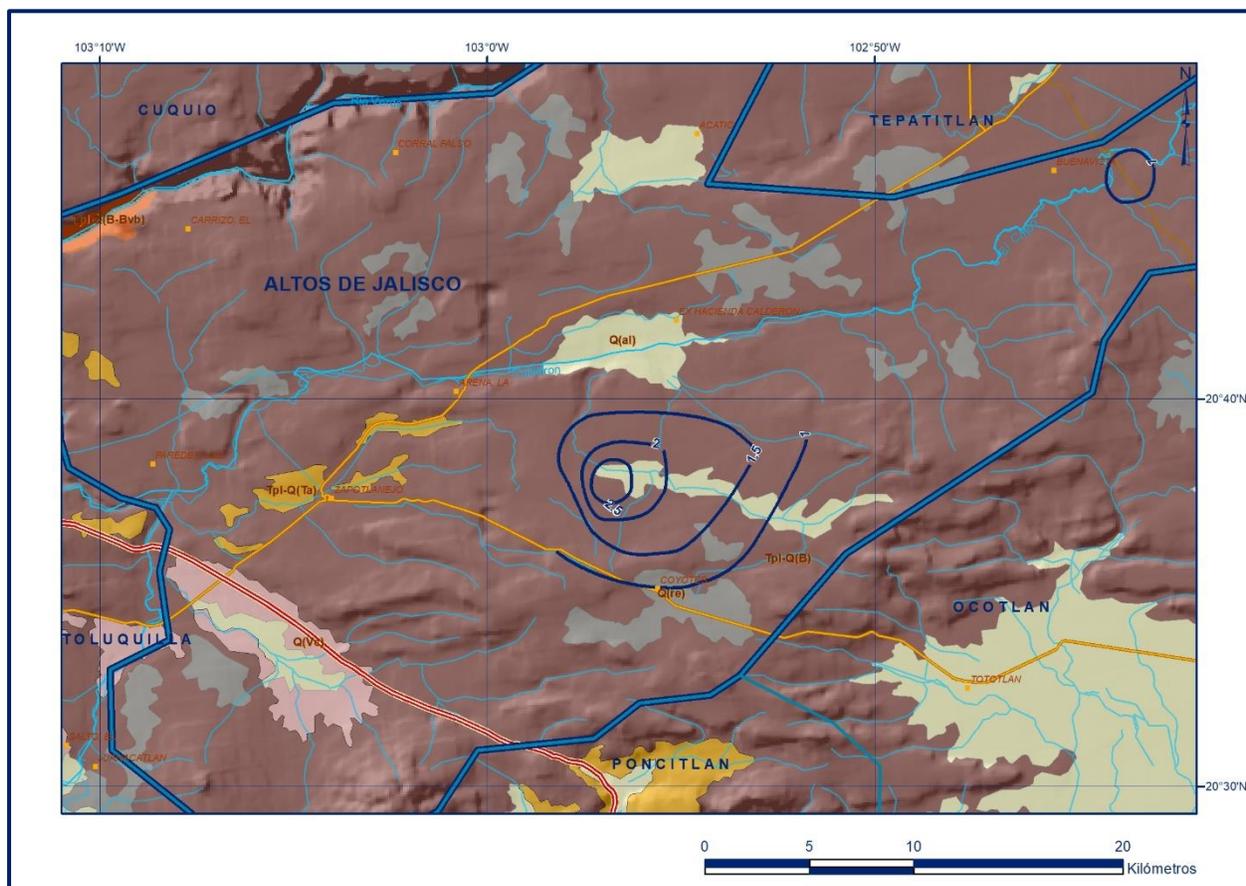


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2006-2007)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La clasificación del agua subterránea del acuífero Altos de Jalisco, se apoyó en los resultados de análisis físico-químicos de 5 muestras, tomadas durante el estudio realizado en 2007, pozos números 74-Gigantes, N° 26- Coyotes, N° 100-Granjas, N° 150-Jesús Martínez R., y N° 82- Crucero Santa Fe; así como con el apoyo de información existente de otros 5 pozos: San Roque, La Lenteja, La Estancia y pozo 1 y 2. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los análisis físico-químicos

POZO	LABORATORIO	RESULTADOS DE LABORATORIO																			
		Al	Ca	C.E	D.T	Fe	F	F.T	Mg	Mn	NO ₃	NO ₂	Nit.Amon.	K	Si	Na	SDT	SO ₄	pH	Allc. Tot.	CaCO ₃
		ug/L	mg/L	uS/cm	mg/L	ug/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	UppH	mg/L	mg/L
74	L.Gomco	14.21	37.26	304	112	6.95	0.19	0.076	15.91	nd	2.54	0.0014	0.08	9.07	33.96	27.61	236	7.05	8.00	131	131
26	L.Gomco	nd	18.65	186	72	23.90	0.087	0.116	10.02	9.32	3.33	0.088	0.067	5.2	33.9	10.36	172	13.85	7.81	78	78
100	L.Gomco	31.38	29.6	322	99	832.3	0.153	0.032	12.22	17.83	0.85	0.079	0.077	7.8	42.28	31.96	254	14.84	7.76	151	151
150	L.Gomco	33.45	29.04	189	74	619.9	0.66	0.272	11.2	nd	0.413	0.0056	0.098	6.4	42	14.75	194	nd	7.62	90	90
S. Roque	GEJ	nd	nd	nd	127.12	0.06	nd	nd	nd	nd	1.3	0	nd	nd	nd	nd	125	6	7.81	nd	nd
Lentejas	GEJ	nd	nd	nd	386.13	0.06	nd	nd	nd	nd	1.4	0.02	nd	nd	nd	nd	276	43	7.53	nd	nd
P1Urbi	GEJ	nd	nd	nd	61.5	0.53	nd	nd	nd	0.02	1.8	0	nd	nd	nd	nd	158	6.3	8.28	nd	nd
P2Urbi	GEJ	nd	nd	nd	248	0.07	nd	nd	nd	3.06	2.6	0	nd	nd	nd	nd	231	11.4	8.13	nd	nd

Con base en la información anterior, se establece que en términos globales el agua es apta para todo uso, clasificada como Sódica-Sulfatada, moderadamente suave.

La calidad química del agua para uso de agua potable en general puede dictaminarse como excelente ya que su contenido en sólidos totales disueltos es inferior a las 300 ppm.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el año 2007, existen un total de 169 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 158 están activos y los 11 restantes inactivos.

La distribución por usos de los aprovechamientos activos es de la siguiente forma: para uso agrícola 63 aprovechamientos, pecuario 14, avícola 29, acuícola 1, público-urbano y doméstico 38, servicios 11 y para uso industrial 2.

El volumen de extracción estimado asciende a 9.5 hm³/año, de los cuales 3.7 hm³ son para uso agropecuario (principalmente agrícola), 5.6 hm³ para público urbano y doméstico, y los 0.2 hm³ restantes para uso industrial y servicios.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea involucra el registro de las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento, modificaciones que suceden en un volumen específico del acuífero en un determinado tiempo.

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 anualmente por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo definido.

La ecuación general de balance, de acuerdo con 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 están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero:

$$\text{Recarga Total (Rt)} - \text{Descarga total (Dt)} = \text{Cambio de almacenamiento } \pm \Delta V(s)$$

La ecuación de balance definida es:

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

Dónde:

Eh = Entrada horizontal por flujo subterráneo

Rv = Recarga vertical

Ri = Recarga inducida

Sh = Salida horizontal por flujo subterráneo

ETR = Evapotranspiración

Dm = Descarga a través de manantiales

B = Bombeo

ΔV_s = Cambio en el almacenamiento

Debido a que la escasa información piezométrica se restringe a una pequeña porción del acuífero, y ante la evidencia de que se registran recuperaciones del nivel estático, se optó por evaluar la recarga vertical de manera conservadora, a través de un balance hidrometeorológico, y considerar como incógnita en la ecuación de balance al cambio de almacenamiento.

7.1. Entradas

En la aplicación de la ecuación de balance se considera que existen entradas horizontales mediante flujo subterráneo que provienen de zonas montañosas contiguas (Eh), las verticales (Rv) que se producen por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle, y las inducidas (Ri) por retornos de riego y fugas en la red de abastecimiento.

7.1.1. Recarga vertical

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre a su salida recibe el nombre genérico de pérdidas. En general, las pérdidas están constituidas por la interceptación en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. Además de que en la práctica es separar estos cuatro componentes, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas bajo este nombre.

A pesar de contar con el plano de elevación del nivel estático donde se pudieron marcar celdas de entradas horizontales, se optó por el planteamiento de un balance hidrometeorológico para la estimación conservadora de la recarga total que recibe al acuífero, debido a la gran variación de información de parámetros hidráulicos, esto principalmente debido a que una buena parte de los pozos se aloja en las rocas volcánicas de tipo basáltico con diferente grado de fracturamiento.

Para realizar el balance hidrometeorológico se requiere conocer entre otros parámetros, los volúmenes de escurrimiento que se presentan por lluvia dentro del área del acuífero, es decir, es necesario determinar el volumen de agua que se genera por cuenca propia; sin embargo, no se disponen de aforos específicos que permitan cuantificar dicho volumen. En este sentido, a continuación se menciona la forma en que se procedió para obtenerlo.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, que señala que en caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento. El volumen anual medio de escurrimiento natural en términos genéricos es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que es función del tipo y uso de suelo. Para la zona del acuífero se consideró un valor de $K = 0.27$, que corresponde a suelos medianamente permeables, uso del suelo con cultivos en hilera, legumbres o rotación de pradera y granos pequeños.

Aplicando este valor de K en la ecuación:

$$C_e = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

Donde P = Precipitación anual, en mm.

Se obtiene un coeficiente de escurrimiento de:

$$C_e = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5 = 0.27 * (898.9 - 250) / 2000 + (0.27 - 0.15) / 1.5 = 0.1676$$

De esta manera el volumen escurrido sería: $V_e = C_e \times V_{\text{llovido}} = 0.1676 \times 1365.4 = 228.8 \text{ hm}^3$

$$V_{\text{llovido}} = P \times \text{Área} = 0.8989 \times 1519 = 1365.4 \text{ hm}^3$$

Para conocer el orden de magnitud del volumen de infiltración por lluvia que se presenta en el sistema, se realizó el balance de agua superficial con apoyo en la fórmula de Turc para calcular la evapotranspiración y dejar como incógnita a la infiltración, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Infiltración} = \text{precipitación} - \text{evapotranspiración} - \text{escurrimiento}$$

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), se hizo uso de la fórmula de Turc, la cual indica que:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en metros/año

P = Precipitación media anual (898.9 mm)

T = Temperatura media anual (18.5° C)

El volumen evapotranspirado sería: Evapotranspiración (Turc) x Área = 0.712 (mm) * 1519 km² = 1081.5 hm³.

El Volumen infiltrado o recarga vertical, resulta de restarle al volumen precipitado, el volumen escurrido, y el evapotranspirado = 1365.4 – 228.8 – 1081.5 = **55.1 hm³**.

El área donde se realizaron los cálculos es el área total del acuífero, ya que en la mayoría de la superficie aflora el mismo tipo de roca y los aprovechamientos que existen se localizan en su totalidad.

De esta manera, se considera que el valor de la recarga vertical por lluvia en todo el acuífero es de 55.1 hm³ anuales.

$$R_v = 55.1 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

7.1.2. Recarga inducida

Aun en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie del agua subterránea

El volumen de agua para uso agrícola se tomo del censo realizado en 2007, considerando que el 20% regresa al acuífero como recarga efectiva, tenemos:

$$V_R = V_{AGR} * (\% \text{ de retorno}) = 7.7 \text{ (incluyen } 4.0 \text{ hm}^3 \text{ de aguas superficiales)} * 0.20 = 1.54 \text{ hm}^3$$

El volumen destinado para el uso público-urbano es de 5.6 hm³/año, considerando que un 20% del volumen total utilizado retorna al acuífero por fugas en las redes de abastecimiento, la recarga resulta de 1.12 hm³/año. Por lo tanto, el total de la Recarga inducida es de **2.7 hm³/año**.

7.1.3. Entrada horizontal por flujo subterráneo

Las entradas por flujo horizontal en el acuífero Altos de Jalisco, corresponden a las salidas horizontales del acuífero Tepatitlán.

De la figura 5 se puede observar que se identificaron 4 celdas de flujo subterráneo, dentro del acuífero Tepatitlán, a través de las cuales fluye un volumen que ingresa al acuífero Altos de Jalisco.

Considerando una $K = 4.7 \times 10^{-9}$ para las arcillas y $K = 2 \times 10^{-2}$ para basaltos fracturados, se determinó un valor promedio de $K = 3.35 \times 10^{-6}$ m/s, si tomamos en cuenta un espesor saturado $b = 100$ m, resulta una transmisividad, $T = 3.35 \times 10^{-4}$ m²/s.

Aplicando la Ley de Darcy

$$Q = (Kb) * B * \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right)$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica (m/día)

b = Espesor del acuífero (m)

B = Ancho de la celda de flujo (m)

$\Delta H/\Delta L$ = Gradiente hidráulico (adimensional)

En la tabla 6 se presenta el detalle de cálculo de las entradas subterráneas, en donde se puede observar que su valor asciende a **4.5 hm³ anuales**

Tabla 6. Cálculo de las entradas por flujo horizontal al Acuífero Altos de Jalisco

Canal	Transmisividad $\times 10^{-4}$ (m ² /s)	Ancho del canal B (m)	Largo del canal (m)	Gradiente hidráulico $\times 10^{-2}$	Caudal (m ³ /s)	Volumen hm ³ /año
I	5.074	2327	2267	2.21	0.02604	0.8199
II	5.074	2420	2127	2.35	0.0289	0.9114
III	5.074	5932	2008	2.49	0.0749	2.3620
IV	5.074	1074	2372	2.11	0.0115	0.3630
				suma	0.1936	4.4563

7.2. Salidas

7.2.1. Evapotranspiración

En el acuífero Altos de Jalisco no se registran profundidades someras al nivel del agua subterránea, por lo que no es posible se lleve a cabo el fenómeno de evapotranspiración.

Por lo tanto, **ETR = 0**

7.2.2. Descargas naturales

Esta componente está representada en este acuífero por la descarga a través de manantiales. De acuerdo con las estimaciones realizadas su valor asciende a **0.6 hm³/año.**

7.2.3. Bombeo

Con base en el censo e hidrometría realizados en el acuífero, se determinó que el volumen de extracción de agua subterránea es del orden de los **9.5 hm³ anuales.**

7.2.4. Flujo subterráneo horizontal

Para el caso de este acuífero, de la configuración de elevación del nivel estático mostrada en la figura 5, se observa que no existen salidas subterráneas. La dirección de flujo subterráneo en las tres unidades hidrogeológicas identificadas, y en general del acuífero Altos de Jalisco es hacia los ríos Verde y Santiago, sin embargo, en el cañón de estos ríos, cuyas profundidades son del orden de 300 a 600 m, no existen manantiales que evidencien la descarga, por lo que de existir salidas subterráneas

deben ser muy profundas y hacia los acuíferos de Atemajac, Toluquilla. Por lo tanto, para fines de este balance **Sh = 0**.

Solución de la ecuación de balance

Una vez que se han evaluado los términos de la ecuación, se procede a evaluar el valor del cambio de almacenamiento. De acuerdo con la ecuación correspondiente:

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

Sustituyendo el valor de las componentes de la ecuación de balance:

$$\Delta V(S) = 55.1 + 4.5 + 2.7 - 9.5 - 0.0 - 0.6 - 0.0 = 52.2$$

$$\Delta V(S) = 52.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Si tomamos en cuenta que el área de explotación en el valle es de 1,519 km², el valor del cambio de almacenamiento representa un ascenso del nivel estático de 3.4 m anuales. El resumen del balance de aguas subterráneas se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del balance de aguas subterráneas

Entradas	hm³/año
Entradas por flujo subterráneo horizontal	4.5
Recarga inducida	2.7
Recarga vertical por lluvia	55.1
Total entradas	62.3

Salidas	hm³/año
Bombeo	9.5
Descarga manantiales	0.6
Total salidas	10.1

Entradas-salidas	52.2
-------------------------	-------------

De lo anterior, se desprende que el valor de la recarga total media anual es de **62.3 hm³ 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 del acuífero (Rt) es la suma de los volúmenes que ingresan a el, ya sea en forma natural o inducida.

Para este caso su valor es de resulta de **62.3 hm³/año**, de los cuales 59.6 hm³ corresponden a recarga natural y los 2.7 hm³ restantes a la recarga inducida.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

Para el caso del acuífero Altos de Jalisco los valores de las descargas naturales comprometidas están representadas por la descarga de los manantiales.

Por lo que, **DNC= 0.6 hm³/año**.

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 (REPD), 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 **75,799,562 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 62.3 - 0.6 - 75.799562 \\ \text{DMA} &= -14.099562 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **14,099,562 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Actualización del Estudio Geohidrológico de los valles de Tesistán- Atemajac-Ocotlán, Jal. Realizado por la Compañía Geocalli, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Servicio de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la zona de Acatic, Tepatitlán y Arandas, Jalisco. Realizado por la Compañía, Geólogos Consultores, S.A.