



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TOMATLÁN (1424), 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	6
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1 Provincia Fisiográfica	7
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía.....	12
4.2 Geología Estructural.....	14
4.3 Geología del subsuelo	15
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1 Tipo de acuífero	17
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría	18
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático	18
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático	21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1 Entradas	25
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	26
7.1.3 Recarga incidental (Ri).....	27
7.2 Salidas.....	28
7.2.1 Bombeo (B).....	28
7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)	28
7.2.3 Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	28
7.2.4 Evapotranspiración (ETR).....	29
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	30
8. DISPONIBILIDAD	32
8.1 Recarga total media anual (R).....	32
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	32
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	33
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	33
9. BIBLIOGRAFÍA	34

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Tomatlán, definido con la clave 1424 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Jalisco, entre los paralelos 19°25' y 20°16' de latitud norte y los meridianos 104°31' y 105°34' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 4,547 km². Geopolíticamente, el área del acuífero comprende la mayor parte del municipio de Tomatlán, parcialmente los municipios Talpa de Allende, Villa Purificación y La Huerta; así como porciones pequeñas de Cabo Corrientes, Ayutla y Cuautla, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco.

Limita al norte con los acuíferos Santa María y Mascota, al noroeste con Vista al Mar; al noreste con los acuíferos Mascota, Maravilla y Mixtlán; al este con Unión de Tula y La Huerta, al sur con Miguel Hidalgo, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco; finalmente al sur y oeste su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1).



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 Tomatlán, estado de Jalisco

ACUIFERO 1424 TOMATLAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	105	32	56.5	20	9	24.9	
2	105	29	54.0	20	8	38.2	
3	105	25	2.0	20	9	57.8	
4	105	23	35.7	20	13	36.9	
5	105	20	57.5	20	15	13.0	
6	105	14	44.6	20	13	3.7	
7	105	8	12.9	20	8	24.9	
8	105	9	52.5	20	6	32.1	
9	105	9	6.0	20	2	13.2	
10	105	12	18.5	19	58	20.8	
11	105	8	39.5	19	56	21.3	
12	105	5	40.2	19	57	27.7	
13	105	1	47.9	19	56	8.0	
14	104	57	22.3	20	3	19.5	
15	104	54	56.3	20	10	24.4	
16	104	51	43.8	20	13	17.0	
17	104	50	32.8	20	15	11.2	
18	104	44	1.9	20	12	39.0	
19	104	40	26.6	20	9	37.9	
20	104	37	0.9	20	5	12.4	
21	104	35	14.6	20	1	20.0	
22	104	32	35.3	19	58	27.4	
23	104	31	48.8	19	51	42.5	
24	104	32	2.1	19	50	56.0	
25	104	36	47.6	19	50	22.8	
26	104	38	13.9	19	51	15.9	
27	104	46	31.8	19	48	23.3	
28	104	50	10.8	19	46	30.5	
29	104	50	10.8	19	44	17.7	
30	104	52	23.6	19	45	10.8	
31	104	53	56.5	19	43	57.8	
32	104	51	30.5	19	41	51.7	
33	104	53	49.9	19	39	58.8	
34	104	56	42.5	19	37	52.7	
35	104	56	16.0	19	35	20.0	
36	104	56	42.5	19	32	54.0	
37	104	59	15.2	19	31	21.0	
38	104	58	28.7	19	28	48.3	
39	104	58	15.4	19	27	48.6	
40	104	59	28.5	19	25	15.9	
41	105	1	27.4	19	25	22.8	DEL 41 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	105	32	56.5	20	9	24.9	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Tomatlán pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma-Santiago-Pacífico” y al Consejo de Cuenca Costa Pacífico Centro, a la fecha aún por instalar. Su territorio completo se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

En la mayor parte del acuífero, que abarca la porción occidental, central, sur y nororiental rige el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los Municipios de Tomatlán, La Huerta, Cihuatlán y Tonalá, Jal.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de Septiembre de 1984.

Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la superficie restante, que cubre los extremos noroccidental, nororiental y oriental, está vigente el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en 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 DOF el 07 de diciembre de 1987.

Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la porción sur del acuífero se localizan las Áreas Naturales Protegidas, catalogadas como Reserva de la Biosfera “Chamela-Cuixmala”, decretada el 25 de noviembre de 1994, y el Santuario denominado “Islas de la Bahía de Chamela”, decretado el 13 de junio de 2002.

En su extremo nororiental se localiza una pequeña porción del Área de Protección de los Recursos Naturales Zona Protectora Forestal denominada “Sierra de Vallejo Ameca”, decretada el 7 de noviembre de 2002. En la región costera existen los sitios RAMSAR denominados “Sistema Estuarino Agua Dulce-Ermitaño”, “Estero El Chorro”, “Estero Majahuas”, “Laguna Xola-Paramán”, “Laguna de Chalacatepec”; todos ellos establecidos en el año 2008, la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala”, establecida en el año 2004 y el Santuario Playa de Mismaloya, decretado el 18 de julio de 2002.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia del Agua de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua del agua subterránea es el público-urbano.

En la región occidental de la superficie que cubre el acuífero se localiza el Distrito de Riego 093 "Tomatlán"; a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional.

Los únicos que abarcaron la superficie completa del acuífero son los que mencionan a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS, VALLE DE GUADALUPE, PRIMO VERDAD, LA HUERTA, MIGUEL HIDALGO, CIHUATLÁN, 20 DE NOVIEMBRE, CUQUÍO, COLOTLÁN, TECOLOTLÁN, TOMATLÁN, TEQUILA Y LA BARCA, EN EL ESTADO DE JALISCO. Realizado por la Universidad Autónoma del Estado México para la Comisión Nacional del Agua en 2010. Este estudio tuvo como objetivo actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas del acuífero para determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Como parte de las actividades de campo se realizó un censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, cuyos resultados se utilizaron para plantear el balance de aguas subterráneas y calcular la recarga total media anual.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO TOMATLÁN (1424), EN EL ESTADO DE JALISCO. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en 2014-2015 para la Comisión Estatal del Agua de Jalisco. Este trabajo tuvo como objetivo actualizar el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad para definir el potencial de desarrollo de las actividades económicas de la región. Incluye actividades de campo como censo e hidrometría, nivelación de brocales, ejecución e interpretación de pruebas de bombeo, sondeos electromagnéticos y muestreo de aguas para análisis fisicoquímicos. Este último estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur. Según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), se localiza en el sector occidental de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima.

Está situado en una zona de traslapamiento de tres grandes provincias fisiográficas que le confieren fuertes contrastes topográficos y un ambiente tectónico complejo: el contacto entre la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico; entre la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur, y entre la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. Estas zonas particulares definen la diversa litología, geología y morfología del territorio jalisciense.

La Provincia Sierra Madre del Sur inicia en la frontera entre los estados de Jalisco y Nayarit hasta el estado de Oaxaca cubriendo un área de 258,274 km², aunque dentro del territorio jalisciense su extensión es aproximadamente de 246 km de longitud. Limita al norte y este Eje Neovolcánico, Subprovincias Sierras Neovolcánicas Nayaritas y Sierras de Jalisco, respectivamente; al sur con el Océano Pacífico. Su región más prominente es muy angosta, formando un espinazo montañoso marginal hacia la costa del Océano Pacífico.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes en la mayor parte de la superficie que comprende el acuífero se encuentran en el rango del tipo templado subhúmedo, al semicálido subhúmedo, con una temperatura media anual de 24.9 °C. La climatología de la cuenca es heterogénea, con variaciones anuales predominantemente de semiseco a húmedo, con otoño y primavera secos, e invierno de seco a húmedo, hasta el cálido, sin cambio térmico invernal bien definido.

En la zona costera del acuífero, predomina el clima BS1(h)w, semiárido muy cálido, en una franja irregular que se extiende desde la mitad de la costa del municipio de Tomatlán hasta la zona costera del municipio de la Huerta. Este tipo de clima impera sobre un 7% del territorio estatal, especialmente en la región litoral, con un régimen de lluvias entre junio y octubre.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 11 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Tuito, Talpa de Allende, Llano Grande, El Bramador, Cajón de Peña, Gargantillo, Tomatlán, Higuera Blanca, Acihuatl, Cuitzmala y Apazulco, para diferentes periodos de medición, el más grande 1951-2014 y el más corto 1969-1987.

Con estos datos y utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1,113.6 mm** y **24.2 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2055.5 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno en verano de junio a octubre, cuando se registran los valores más altos, y otro de febrero a abril, con precipitaciones menos significativas. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, julio es el mes más cálido, con una temperatura media de 32.1°C, y en febrero se registra la menor temperatura media de 17.7°C.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 15 “Costa de Jalisco”, Subregión Hidrológica Costa de Jalisco, cuenca del Río Tomatlán-Tecuán, subcuencas de los ríos Mismaloya y Tomatlán, y cuenca del Río San Nicolás-Cuitzmala, subcuencas de los ríos San Nicolás y Cuitzmala.

La cuenca del Río Tomatlán-Tecuán pertenece a la vertiente del Pacífico, drenando una superficie de 3,795 km², que representa el 4.8% de la superficie estatal. Su red de drenaje es de tipo subparalelo y dendrítico, conformado por numerosas corrientes intermitentes y perennes que desembocan en el Océano Pacífico, entre las que sobresalen los ríos Tomatlán, San Nicolás y María García, originados en la sierra de Cacoma, los cuales presentan una dirección preferencial del noreste al suroeste hasta desembocar, casi en forma paralela, en el Océano Pacífico. Otros ríos importantes son los conocidos con los nombres de Los Prietos y Tecuán. La cuenca del río Tomatlán tiene su origen en la Sierra de Talpa. Los recursos hídricos de este río proporcionan agua a la Presa Cajón de Peña, que es la de mayor importancia en el estado de Jalisco con una capacidad de almacenamiento de 707 hm³, para el riego de una superficie de 70,000 ha del Distrito de Riego 093; aguas abajo confluye con el río San Nicolás.

El curso de este río forma un parteaguas en las sierras de Talpa y Cacoma, dividiendo a los municipios de Villa Purificación y La Huerta con Tomatlán. Su desembocadura en el Océano Pacífico ocurre en el lugar conocido como "Punta Roca Negra". La estación hidrométrica "Cajón de Peña" ubicada en este río registra en volumen medio anual de escurrimiento de 1,608 hm³.

Por su parte, el río San Nicolás nace en la región sur de la serranía de Velasco, situada en la sierra de Cacoma, atraviesa los municipios de Tomatlán y La Huerta, para finalmente desembocar en el sitio conocido como "Punta Pérula", ubicado al norte de "Punta Careyes". A lo largo de su recorrido presenta dirección preferente hacia el suroeste hasta desembocar en el Océano Pacífico.

3.4 Geomorfología

El relieve montañoso de la Sierra Madre del Sur muestra varias etapas de deformación, la más evidente es la intrusión de cuerpos graníticos en las rocas metasedimentarias (Ferrari et al., 1997), sedimentarias, ígneas preexistentes y secuencias vulcanosedimentarias. Los procesos sedimentarios constituyen sierras plegadas y bloques colgados, mientras que el relieve de las rocas vulcanosedimentarias e ígneas es de sierras complejas con pendientes escarpadas.

En los cuerpos intrusivos, el relieve es abrupto en zonas poco erosionadas y se exhibe con topografía suave en zonas erosionadas, con presencia de intemperismo esferoidal. La región se encuentra en una etapa de madurez avanzada dentro del ciclo geomorfológico. La mayor parte del territorio de la cuenca del Río Tomatlán presenta una topografía más o menos plana, con aproximadamente 45 km de litoral. Su porción central forma un valle que se extiende de este a oeste hasta la costa, abarcando una amplia zona con altitudes que varían del nivel del mar hasta los 600 msnm.

La región nororiental presenta altitudes heterogéneas entre los 600 y 2100 msnm, en tanto que en el extremo oriental de la cuenca se presenta una topografía preferentemente semiplana y plana en las que las laderas de las sierras y lomeríos registran alturas entre 400 y 800 msnm.

La porción sur se caracteriza por las planicies predominantes en dirección a la zona costera. El contraste topográfico tiene lugar en el extremo nororiental en donde el relieve es más accidentado, destacando las sierras Arrastradero y Bosques, que presentan alturas que varían entre 1,600 y 2,100 msnm.

La planicie costera está compuesta por acumulaciones de material detrítico no consolidado del Terciario Superior y Reciente interrumpido por antiguas islas, ahora en forma de cerros y pequeñas serranías constituidas por rocas metamórficas e ígneas; en la franja costera existen esteros, bahías y depósitos arenosos que debido a la acción de las corrientes litorales, mareas, oleaje y vientos, han desarrollado dunas paralelas, barras, barras-islas y flechas.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial de la cuenca muestra una presencia predominantemente granítica intercalada con rocas ígneas extrusivas ácidas y tobas. Sin embargo, en la zona costera, esta intercalación es al norte con materiales residuales y aluviales, al centro con materiales aluviales, ígneos y conglomerados y al sur con materiales tobáceos (figura 2).

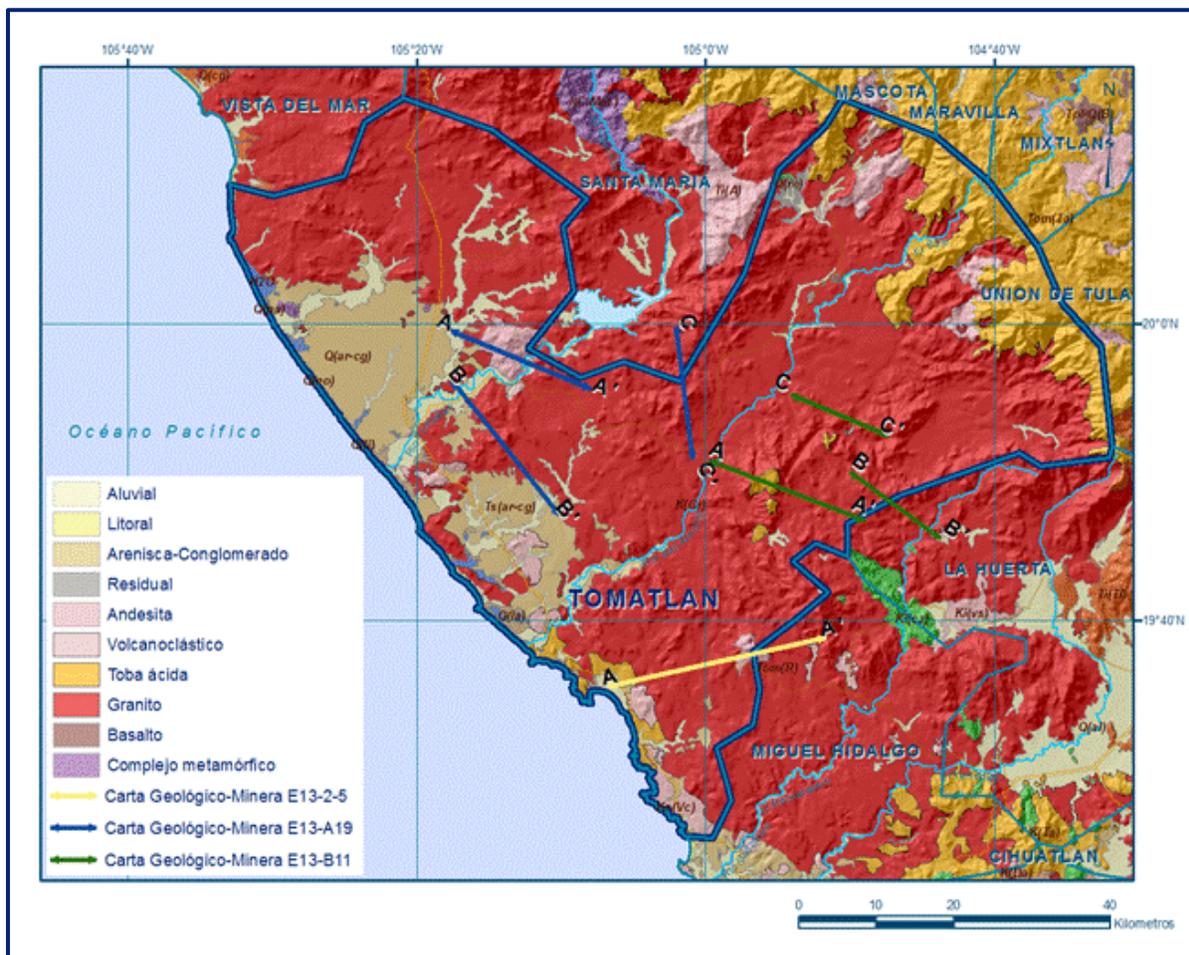


Figura 2. Geología general del acuífero

La región se localiza en la porción centro-occidental del estado de Jalisco, cuyo extremo norte limita con el estado de Nayarit. Comprende una superficie de 17,400 km², en la zona de confluencia de la Sierra Madre Occidental, en su porción sur; Eje Neovolcánico, hacia la región este-noreste; y Sierra Madre del Sur, en su porción noroeste.

Los fechamientos radiométricos y sus posiciones estratigráficas sustentan la columna estratigráfica propuesta, la cual se ubica geológicamente en el denominado Bloque Jalisco (Luhr, et al., 1985; Allan, et al., 1991). La base de la columna está representada por rocas vulcanosedimentarias, constituidas por riolitas-riodacitas, interestratificadas con calizas arcillosas, lutitas negras y limolitas; con metamorfismo de facies de esquistos verdes (Ferrari et. al., 1997), que afloran en la porción norte-centro (Cuale, Cerro de la Tortuga, La Cruz de Loreto, Talpa y Santiago los Pinos), a la que se le asigna una edad tentativa del Jurásico-Cretácico Inferior.

En la porción sureste afloran rocas carbonatadas, de facies bioarrecifales, definidas por PEMEX como Formación Tepalcatepec, del Albiano-Cenomaniano, las cuales están cubiertas por rocas volcánicas del Terciario Superior. En la zona occidental aflora el Batolito Puerto Vallarta (Gastil et. al. 1978), en forma de complejos ígneos, troncos, apófisis y diques, cuya composición varía de granito a granodiorita en su porción central, y de diorita a tonalita en la región de Puerto Vallarta, Cabo Corrientes y Punta Mita. Las edades radiométricas (K-Ar) varían de 100 a 73 Ma. (Gastil et. al., 1978, Allan 1986, Kohler et al., 1988).

Afloran también rocas graníticas de 67 Ma. (Rosas Elguera, 1998) en la porción noreste y norte de 51-56 Ma (Rosas E.). En la región sur y oriental afloran rocas volcánicas intermedias, correlacionables con el vulcanismo del Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental (McDowell, et. al., 1991), constituido por pórfidos, tobas y aglomerados andesíticos, en contacto transicional con dacitas y riolitas, cuya edad se ha asignado al Cretácico Superior (Righter et al., 1995). En la porción nororiental, afloran tobas riolíticas correlacionables al Complejo Volcánico Superior (McDowell op. cit), asociadas con un complejo sistema de calderas, prominentes, domos y flujos riolíticos, cuya edad es del Cretácico Superior al Paleoceno.

Al noreste afloran riolitas, tobas riolíticas e ignimbritas con intercalaciones de andesitas basálticas, cuya edad varía del Mioceno Superior al Plioceno Inferior (11-8 Ma, Gastil op. cit., Ferrari et. al., 1996).

Este evento puede correlacionarse con el primer episodio volcánico del Cinturón Volcánico Mexicano.

4.1 Estratigrafía

El área que cubre el acuífero se encuentra comprendida principalmente en la provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur y el Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983), Subterreno Zihuatanejo (?) y una cuenca trans-arco que posiblemente corresponda el Subterreno Huetamo.

La secuencia estratigráfica que aflora en esta región está constituida por sedimentos cuya edad varía del Jurásico Inferior al Reciente, conformada por tres eventos distintos de emisión y depósito: la más antigua es una unidad metamórfica, clasificada regionalmente como esquisto y meta-arenisca, cuya edad no se ha definido con exactitud, que aflora como una pequeña ventana en la porción noroccidental, localmente constituida de pizarra carbonosa, meta-arenisca, esquisto y meta-dacita con actinolita con una marcada foliación penetrativa.

El segundo evento es discordante y lo conforma una secuencia vulcanosedimentaria que incluye dos formaciones, en la base la Formación Tecalitlán y en la cima la Formación Tepalcatepec. La Formación Tecalitlán aflora en la región noroccidental como un pequeño remanente y está constituida de piroclastos, clorita y hematita, incluidos en una matriz parcialmente silicificada y con lineación posiblemente causada por cizallamiento; ocasionalmente presenta interestratificaciones de arenisca y lutita; la primera de grano fino a medio, y la lutita poco deleznable; ambas parcialmente silicificadas.

La Formación Tepalcatepec tiene mayor distribución espacial, aflorando en las porciones centro-norte, centro-oeste y noreste. Su base está constituida por rocas vulcanoclásticas y derrames andesíticos; en la parte media predomina toba andesítica con niveles de piroclastos riolíticos y esporádicos depósitos de lutita y arenisca.

La toba andesítica es de textura afanítica, constituida de plagioclasas, minerales opacos y calcita; en ocasiones con trazas de piritita diseminada; los niveles de toba riolítica presentan una micro textura porfídica, a veces foliada, constituida por minerales esenciales de cuarzo, feldespato, plagioclasas y fragmentos de roca; con calcita y cuarzo como minerales secundarios; la lutita es de color gris oscuro, con ligera epidotización.

La unidad metamórfica y las formaciones antes mencionadas, están afectadas por rocas cristalinas de composición granito-granodiorita con diferenciaciones mínimas a diorita, las cuales se consideran parte del batolito Puerto Vallarta del Cretácico Tardío; presenta xenolitos, es de estructura masiva, compacta y en zonas de mayor intemperismo es deleznable, su textura es fanerítica cristalina, constituida por cuarzo, feldespato potásico, hornblenda y biotita.

Afloran ampliamente desde la porción central extendiéndose hacia el norte, sur, este y oeste, cubriendo la mayor superficie del área del acuífero.

Al norte se presenta un pequeño cuerpo de piroxenita, descrito petrográficamente con micro-textura poiquilítica, que contiene piroxeno y olivino como minerales esenciales; minerales opacos, granate y anfíbol como minerales accesorios y hematita como mineral secundario. Su edad no se ha determinado, sin embargo por su correlación en campo se le ubica tentativamente en el Cretácico Superior, su origen podría estar relacionado con plutones emplazados en el arco del Cretácico.

Como último evento sedimentario se tienen depósitos del Pleistoceno al Holoceno. Uno de ellos corresponde a un conglomerado polimíctico con intercalaciones de arena, que forman lomeríos de topografía suave en la porción centro-sur.

Del Holoceno son los depósitos no consolidados de limo-arena que conforman las zonas de cultivo, distribuidos principalmente en la porción sur y occidental, de la misma edad son los depósitos palustres ubicados en la porción suroccidental, al igual que los localizados a lo largo de la zona costera, considerados de litoral y aluviales en los cauces de los ríos y arroyos, así como en las planicies de inundación (Carta Geológico-Minera Tomatlán E13-A19. Escala 1:50,000. SGM, 2016).

Se determinaron tres fases de intrusión, la primera corresponde al emplazamiento de rocas granítico-granodioríticas con diferenciación hasta tonalitas, que conforman el Batolito Puerto Vallarta con edades isotópicas entre 73 a 99 Ma para los granitos y de 93 ± 78 Ma para las tonalitas, que las ubica en el Cretácico Superior, que afectan claramente a las unidades volcánicas y vulcanosedimentarias que conforman el arco Zihuatanejo (?); otra fase es una intrusión diorítica-tonalítica con edades entre 54.9 ± 2 a 66.9 ± 8 Ma, correspondiente al Paleoceno y un último evento de composición monzonítica de posible edad Oligoceno.

4.2 Geología Estructural

Dentro de la provincia Sierra Madre del Sur las secuencias metamórficas del Jurásico, vulcanosedimentarias y sedimentarias del Cretácico fueron comprimidas por efecto de cuerpos graníticos, que las plegaron, fracturaron, afallaron, metamorfosearon y mineralizaron; dichos eventos se han relacionado a la subducción y fusión parcial asociados a uno o más límites convergentes de placas (Morán, 1994).

Los cuerpos intrusivos provocaron en las rocas sedimentarias calcáreas, al igual que en las secuencias vulcanosedimentarias y metamórficas, la formación de bloques colgados de diversas dimensiones.

Dichos cuerpos intrusivos se han denominado Conjunto Batolítico de Jalisco, cuyo ambiente geotectónico es de raíz de arco (Ortega, 1992); tiene una migración temporal del Cretácico al Terciario Inferior; y espacial de la región costera a las zonas internas continentales; los del Terciario Inferior se muestran en el noreste y centro del estado en forma de troncos y diques.

Estructuralmente se presentan tres tipos de deformación: dúctil-frágil, dúctil y frágil. La deformación dúctil-frágil fue originada por procesos compresivos regionales debido a la Orogenia Laramide durante el Campaniano al Eoceno.

La deformación dúctil está representada por plegamiento y cizallamiento, que afecta a las formaciones Tecalitlán y a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Tepalcatepec, en el sector noroeste se interpretaron los anticlinales Sombrío y El Salado.

Los esfuerzos de cizalla están representados por una falla lateral izquierda de nombre El Cuije, expuesta en la región noroccidental. La deformación frágil presenta en orden de importancia, los sistemas de fallas NW, NE y E-W.

Los eventos tectónicos observados en la región evidencian un continuo proceso de subducción de la corteza oceánica bajo el continente americano. La convergencia de las placas Norteamericana y Farallón adoptan una posición burdamente paralela a la margen del Pacífico, originando un arco de islas cuya evolución alcanza su máxima intensidad en el periodo Jurásico Tardío-Cretácico Temprano; es probable que durante este evento se produjera el esquisto y meta-arenisca expuestos en el área.

La migración del arco Jurásico hacia el poniente, generó otro arco magmático de tipo cordillerano en la costa del Pacífico que inició durante el Cretácico Temprano; en esta época probablemente la mayor parte de la costa occidental de Norteamérica estaba formada por una superficie baja inundada por mares epicontinentales, bordeada por la presencia de un arco magmático, evolucionando y generando magmatismo de composición intermedia que resultó continuo, en este contexto tectónico se generaron las formaciones Tecalitlán y Tepalcatepec.

La Orogenia Laramide es el resultado tectónico al movimiento del arco cordillerano hacia el oriente y el levantamiento continental en las márgenes convergentes; ocasionando, a finales del Cretácico, un intenso fracturamiento, relajación y adelgazamiento de la corteza continental, que favoreció el emplazamiento de rocas ultramáficas previo a la emisión del Batolito Puerto Vallarta.

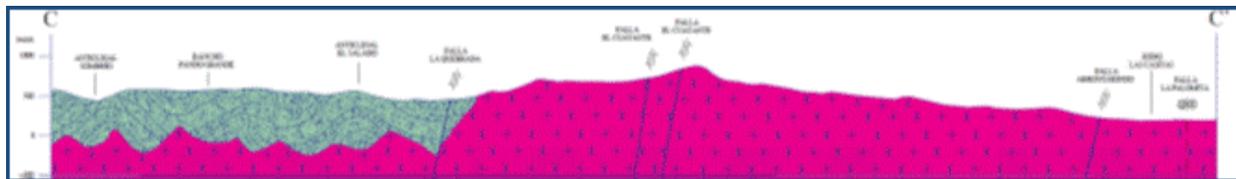
Durante el periodo de relajamiento, también se originó el vulcanismo de la Sierra Madre del Sur y el de la Sierra Madre Occidental. Posteriormente en el Mioceno se originó el Bloque Jalisco que representa una estructura tectónica independiente a las placas Rivera y Norteamérica.

Es probable que los lineamientos o fallas con orientación NW y E-W estén relacionados con la tectónica de relajamiento originada a finales de la Orogenia Laramide y los de orientación NE y N-S con la tectónica que originó al Bloque Jalisco (Carta Geológico-Minera Tomatlán E13-A19. Escala 1:50,000. SGM, 2016).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, geohidrológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en un medio granular conformado por sedimentos aluviales y fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Tomatlán y San Nicolás y otros arroyos tributarios, depósitos vulcanoclásticos, así como areniscas y conglomerados.

Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la Orogenia Laramide.



Fuente: Carta Geológico-Minera E13-A19 "Tomatlán" Esc. 1:50,000 (SGM, 2016)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos de granulometría variada, areniscas y conglomerados, depositados tanto en los subálveos de las corrientes fluviales como en la planicie costera, producto de la erosión de las rocas que constituyen las sierras que delimitan las planicies. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas entre las que destacan granitos, tobas, brechas y rocas vulcanosedimentarias, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de los estudios realizados en 2010 y 2015, se llevaron a cabo 14 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación, 4 del estudio realizado en 2010 y 10 en el estudio llevado a cabo en 2014-2015.

De los resultados de su interpretación por los métodos analíticos convencionales (las 14 pruebas) y por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton (10 pruebas del estudio 2004-2015), se establece que los valores de transmisividad varían de **5.5 a $25.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un promedio de **$15.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en las zonas donde la estratigrafía está compuesta de una combinación de sedimentos aluviales y formaciones fracturadas de rocas ígneas y de **0.15 a $6.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un promedio de **$3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en los depósitos de sedimentos aluviales en la costa.

Considerando un espesor saturado promedio de 50 m, la conductividad hidráulica varía de **3.0×10^{-6} a $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.3 a 43.2 m/d)**. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se obtuvieron 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 los estudios realizados en 2010 y 2014-2015. Debido a que los niveles del agua subterránea no han mostrado cambios significativos en su posición, únicamente se describe el comportamiento observado en 2015.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2015 muestra que los valores variaban de 1 a 8 m. Los niveles más someros, de 1 a 5 m, se registraron en la región costera, en la Bahía Pérula y en los valles de los ríos Tomatlán y San Nicolás, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía, hacia las inmediaciones de las sierras que delimitan los valles. Los valores de mayor profundidad, de 6 a 8 m, se presentan desde Cuzalapa y La Cruz de Loreto hacia El Tule y Criadero, en el valle del Río Tomatlán; y de la carretera federal Puerto Vallarta-Manzanillo hacia el noreste, en dirección al poblado Emiliano Zapata, en el valle del río San Nicolás (figura 4).

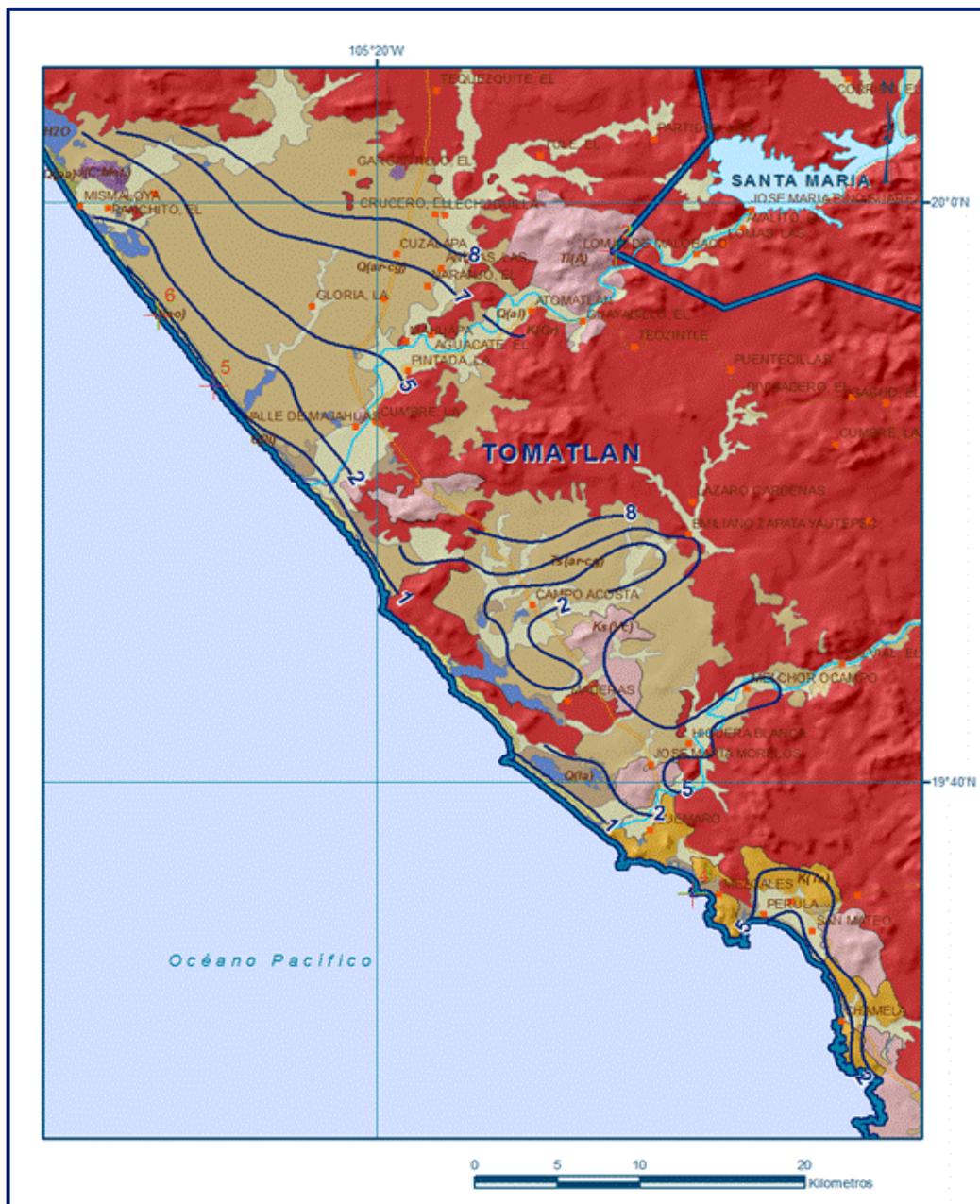


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2015 presentó valores que variaron de 1 a 90 msnm. Las mayores elevaciones se registran en las estribaciones de las sierras que delimitan los valles, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la zona costera. Los valores máximos, de 70 a 90 msnm, se midieron entre las poblaciones El Tequezquite y Pochotitán, en el valle del río Tomatlán, y entre Emiliano Zapata y La Nancy, en el valle del río San Nicolás.

Las menores elevaciones, de 1 a 4 msnm, se presentan en las planicies costeras de los valles. La dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una orientación noreste-suroeste, paralela al escurrimiento de los ríos Tomatlán y San Nicolás (figura 5).



Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2015 no registró cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea; en la mayor parte de la zona de explotación se registraron recuperaciones debido a que en los últimos 3 años ocurrieron precipitaciones superiores a la media anual.

Por esta razón y porque el volumen de recarga es superior al de extracción, no se observan conos de abatimiento que distorsionen la dirección natural del flujo subterráneo hacia el mar.

Los valores de recuperación varían de 1 a 3 m, que representan un promedio anual de 0.1 a 0.6 m, con valores muy locales de 6 m, es decir 1.2 m anuales. En la zona del distrito de riego se registró una recuperación media anual de 0.1 m (figura 6).



Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2010-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en 2010 y 2015, se tomaron 16 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente, 8 muestras en 2010 y 8 más en 2014.

Las determinaciones incluyeron parámetros de temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disueltos, alcalinidad, iones principales, sólidos totales disueltos, algunos iones menores y elementos traza (PO_4 , NO_2 , Br, F), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. Los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaron de 35 a 1687 mg/l, sólo una muestra sobrepasa el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a 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.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 172 a 2410 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la región nororiental del acuífero y se incrementan en dirección general hacia el suroeste, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Los valores de temperatura varían de 21.1 a 32.1 °C y los de pH de 6.8 a 8.7. El agua es de buena calidad para el consumo humano.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que predominan dos familias del agua: bicarbonatada-cálcica en las zonas de recarga ubicadas en las estribaciones de las sierras, y sódica-bicarbonatada en la zona costera. Ambas representan agua de reciente infiltración que han circulado a través de rocas ígneas; con intercambio de sodio por el calcio en la zona cercana al mar. En 2010 se detectó la presencia de Boro en la mitad de las muestras de agua, con valores que variaron de 0.95 a 1.35 mg/l.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS); el mayor número de muestras analizadas se clasifican como C2-S1, que

representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable; seguida de la clasificación C1-S1, que representa agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; ambas aptas para la agricultura sin restricción alguna.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2015, se registraron un total de 268 aprovechamientos; de los cuales 150 son norias, 113 pozos y 5 manantiales.

De ellos, 161 son para uso agrícola, 37 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 64 para uso doméstico-abrevadero, 3 para uso industrial y 3 más para otros usos. Del total de aprovechamientos, 230 están activos y 38 inactivos.

El volumen total de extracción calculado es de **12.5 hm³/año**, de los cuales 4.0 hm³/año (32.0 %) son para uso agrícola, 6.6 hm³/año (52.8 %) para uso público-urbano, 1.6 hm³/año (12.8 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero y 0.3 hm³/año (2.4%) son para otros usos. Adicionalmente, de los **5 manantiales** identificados se descarga un caudal promedio de 335 lps, que equivalen a un volumen anual de 10.6 hm³, para usos múltiples.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2015, en una superficie de 825 km² del acuífero, que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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

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

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 del acuífero:

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

7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego; del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con 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:

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

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal;

Ri= Recarga inducida;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ETR= Evapotranspiración real;

Dm = Descarga a través de manantiales;

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

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

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

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 para 2015 (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:

$$Q = B * i * T$$

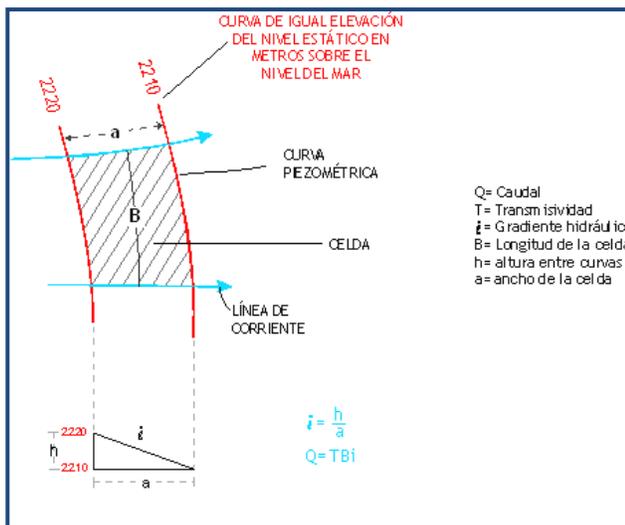
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico
(adimensional)

T = Transmisividad (m²/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 del flujo subterráneo 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.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **26.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2015)

CANAL	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	4485	1310	10	0.00763	0.0020	0.0685	2.2
E2	3740	2990	10	0.00334	0.0025	0.0313	1.0
E3	9345	3365	10	0.00297	0.0040	0.1111	3.5
E4	7100	4485	10	0.00223	0.0040	0.0633	2.0
E5	1870	3365	5	0.00149	0.0150	0.0417	1.3
E6	2990	1120	5	0.00446	0.0025	0.0334	1.1
E7	2240	1495	10	0.00669	0.0025	0.0375	1.2
E8	5045	1120	5	0.00446	0.0035	0.0788	2.5
E9	5235	1680	10	0.00595	0.0030	0.0935	2.9
E10	1870	2805	20	0.00713	0.0080	0.1067	3.4
E11	2240	2240	5	0.00223	0.0100	0.0500	1.6
E12	1680	1310	2	0.00153	0.0100	0.0256	0.8
E13	6170	1120	5	0.00446	0.0010	0.0275	0.9
E14	2990	1870	5	0.00267	0.0100	0.0799	2.5
Total entradas							26.8

7.1.3 Recarga incidental (R_i)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la mayor parte de la superficie agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo.

El volumen total de agua destinada a la agricultura es de 82.3 hm³ anuales, de los cuales 4.0 hm³ corresponden a la extracción de agua subterránea y 78.3 hm³ al volumen promedio mínimo anual de agua superficial procedente de la Presa “Cajón de Peña” que se utiliza en el Distrito de Riego 093. Si consideramos que el 20 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna como recarga efectiva al acuífero, su valor es de **16.5 hm³/año**.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varía según la zona, para este caso se consideró también un promedio de 20%, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano de 6.6 hm³/año, arroja un valor de infiltración de **1.3 hm³/año**. Por lo tanto, **Ri = 17.8 hm³/año**.

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), a través de manantiales (Dm), evapotranspiración (ETR) y bombeo (B).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **12.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

De los 5 manantiales que se registraron en el censo de aprovechamientos, se descarga un caudal conjunto de 335 lps, que equivalen a un caudal del **10.6 hm³/año**.

7.2.3 Salida 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, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **13.1 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2015)

CANAL	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	2240	2615	2	0.00076	0.0070	0.0120	0.4
S2	4860	1765	2	0.00113	0.0070	0.0385	1.2
S3	7850	2240	2	0.00089	0.0045	0.0315	1.0
S4	6355	2615	2	0.00076	0.0045	0.0219	0.7
S5	4110	935	5	0.00535	0.0050	0.1099	3.5
S6	2615	1120	5	0.00446	0.0055	0.0642	2.0
S7	2615	1870	2	0.00107	0.0070	0.0196	0.6
S8	2430	1305	3	0.00230	0.0050	0.0279	0.9
S9	2990	1495	3	0.00201	0.0055	0.0330	1.0
S10	3740	935	2	0.00214	0.0070	0.0560	1.8
Total entradas							13.1

7.2.4 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

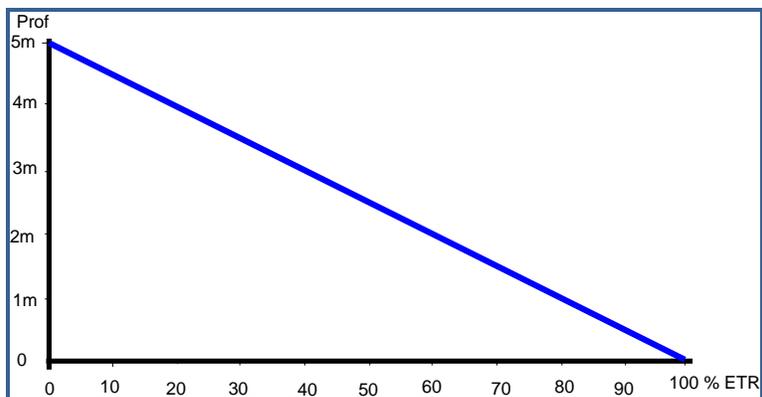
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 26.0 °C y 600 mm, respectivamente, representativos de la zona costera, de acuerdo con los mapas de isoyetas e isotermas obtenidos a partir de los datos de estaciones climatológicas. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 597.7 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	26		
P(mm) =	600	P ² =	360000
L =	1828.8	L ² =	3344509.44
ETR (mm)	597.7		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor o igual a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático.

El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 82.1 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración real

Intervalo entre curvas (m)	Profundidad media (m)	Área (km ²)	%	Lámina de ETR (m)	Volumen de ETR (hm ³ /año)
0 a 1	0.5	20.6	0.9	0.5977	11.1
0 a 2	1.0	6.4	0.8	0.5977	3.1
1 a 2	1.5	53.5	0.7	0.5977	22.4
2	2	30.4	0.6	0.5977	10.9
2 a 5	3.5	193.5	0.3	0.5977	34.7
	TOTAL	304.4		TOTAL	82.1

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2010-2015 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.10, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 28.5 hm³, es decir, un promedio anual de **5.7 hm³**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2010-2015)

Evolución (m)	Evolución promedio (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
1	1.0	126.6	0.1	12.7
6	6.0	2.4	0.1	1.4
3 a 6	4.5	9.8	0.1	4.4
1 a 3	2.0	27.5	0.1	5.5
3	3.0	1.1	0.1	0.3
5	5.0	3.9	0.1	2.0
1 a 5	3.0	7.4	0.1	2.2
	TOTAL	178.7	TOTAL	28.5
		Promedio anual		5.7

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:

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

$$R_v = 12.5 + 13.1 + 10.6 + 82.1 + 5.7 - 26.8 - 17.8$$

$$R_v = 79.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 79.4 + 26.8 + 17.8$$

$$R = 124.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **124.0 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

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 este caso, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **85.3 hm³ anuales**, de los cuales 10.6 hm³ corresponden a la descarga de los manantiales 13.1 hm³ a las salidas subterráneas hacia el mar para mantener la posición de la interface marina y 61.6 hm³ al 75 % de la evapotranspiración, que se debe comprometer para preservar el ecosistema costero de las lagunas, esteros, zonas naturales protegidas y sitios Ramsar.

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 **36,764,664 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 124.0 - 85.3 - 36.764664 \\ \text{DMA} &= 1.935336 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,935,336 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico, 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Valle de Guadalupe, Primo de Verdad, La Huerta, Miguel Hidalgo, Cihuatlán, 20 de Noviembre, Cuquío, Colotlán, Tecolotlán, Tomatlán, Tequila y La Barca, en el estado de Jalisco. Realizado por la Universidad Autónoma del Estado de México.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Tomatlán, estado de Jalisco.