



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO ARRIAGA-PIJIJAPAN (0711), ESTADO  
DE CHIAPAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero .....	3
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA .....</b>	<b>6</b>
3.1. Provincias fisiográficas.....	6
3.2. Clima.....	7
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología.....	9
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología estructural.....	14
4.3. Geología del subsuelo.....	15
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
5.1. Tipo de acuífero.....	16
5.2. Parámetros hidráulicos .....	16
5.3. Piezometría .....	17
5.4. Comportamiento hidráulico .....	17
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2. Elevación del nivel estático .....	18
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	19
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	20
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....</b>	<b>21</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>21</b>
7.1. Entradas.....	22
7.1.1. Recarga vertical (Rv) .....	22
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	23
7.1.3. Recarga incidental (Ri) .....	24
7.2. Salidas.....	24
7.2.1. Bombeo (B).....	24
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	25
7.2.3. Evapotranspiración (ETR) .....	25
7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb).....	27
7.3. Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ) .....	27
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>28</b>
8.1. Recarga total media anual (R) .....	29
8.2. Descarga natural comprendida (DNC) .....	29
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	29
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	30
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>31</b>

## **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 Arriaga-Pijijiapan, definido con la clave 0711 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroccidental del estado de Chiapas, en el límite con el estado de Oaxaca, entre los paralelos 15°26'50" y 16°24'56" de latitud norte y entre los meridianos 92°59'48" y 94°06'43" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,142 km<sup>2</sup>.

Limita al norte y este con el acuífero Fraylesca, al noroeste con Cintalapa, ambos del estado de Chiapas; Coatzacoalcos, al oeste con el acuífero Ostuta, del estado de Oaxaca. Al sur su límite natural es el Golfo de Tehuantepec en el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende casi totalmente los municipios Arriaga y Tonalá, la mayor parte de Pijijiapan y pequeñas porciones de Cintalapa, Jiquipilas, Villaflores, Vila Corzo y Concordia.



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.

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Frontera Sur y al Consejo de Cuenca Costa de Chiapas, instalado el 26 de enero de 2000. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. Sólo una pequeña área serrana de sus extremos oriental y noroccidental se encuentran sujetas a las disposiciones del decreto de veda *“Acuerdo que establece el Distrito de Riego, Drenaje y Control de Inundaciones del Bajo Río Grijalva, en el Estado de Tabasco”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de octubre de 1957. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

**ACUIFERO 0711 ARRIAGA-PIJIJAPAN**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	93	55	35.5	16	21	28.5	
2	93	48	55.8	16	20	39.0	
3	93	44	27.2	16	19	8.1	
4	93	43	16.4	16	17	57.5	
5	93	44	21.1	16	15	24.1	
6	93	42	24.5	16	11	52.6	
7	93	36	39.6	16	11	46.3	
8	93	36	18.1	16	6	0.3	
9	93	32	23.6	16	0	55.0	
10	93	30	19.3	16	0	57.2	
11	93	28	36.8	15	58	8.2	
12	93	26	42.3	15	58	19.1	
13	93	21	34.8	15	54	12.6	
14	93	17	34.9	15	53	45.4	
15	93	15	7.7	15	51	53.1	
16	93	12	1.2	15	51	29.1	
17	93	8	4.6	15	52	45.4	
18	93	5	9.0	15	48	41.1	
19	93	4	59.2	15	45	19.4	
20	93	0	41.2	15	43	44.0	
21	92	59	47.7	15	42	30.1	
22	93	1	41.8	15	41	32.6	
23	93	3	46.1	15	38	27.2	
24	93	8	19.9	15	29	30.8	
25	93	9	56.5	15	26	49.0	DEL 25 AL 26 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
26	93	59	50.8	16	0	2.6	DEL 26 AL 27 POR EL LIMITE ESTATAL
27	94	3	22.3	16	23	41.0	
28	94	2	0.0	16	24	55.9	
1	93	55	35.5	16	21	28.5	

En la mayor parte de la superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Arriaga-Pijijiapan, clave 0711, se encuentra sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento

de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

En su zona costera se localizan tres sitios RAMSAR, dos ubicados en la región suroccidental y otro en la porción suroriental, denominados “Sistema Estuarino Puerto Arista”, “Sistema Estuarino Boca del Cielo” y “Reserva de la Biosfera La Encrucijada”, decretados los dos primeros el 2 de febrero de 2008 y el último el 20 de marzo de 1996. En su zona serrana se localizan las reservas de la biosfera “La Sepultura” y “El Triunfo”, decretadas el 6 de junio de 1995 y 15 de junio de 1990, respectivamente; y la Zona de Protección Forestal en los terrenos que se encuentran en los municipios de La Concordia, Ángel Albino Corzo, Villa Flores y Jiquipilas”, decretada el 20 de marzo de 1979.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**INFORME DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICOPRELIMINAR DE LA ZONA DEL RÍO OSTUTA, OAXACA. Realizado en 1972 por HIDROTEC, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH).** El estudio tuvo como objetivo conocer las zonas acuíferas y funcionamiento, para realizar una evaluación preliminar de los recursos disponibles y establecer la conveniencia de continuar con investigaciones futuras. Entre sus actividades de campo relevantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, nivelación de brocales de pozos, ejecución de pruebas de bombeo, toma de muestra de agua subterránea para análisis físicoquímicos, reconocimientos hidrogeológicos y exploraciones geoeléctricas. Concluye que los materiales de relleno forman acuíferos granulares de tipo libre, con una transmisividad promedio de  $4.1 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s y un coeficiente de almacenamiento regional de  $2.5 \times 10^{-3}$ .

**SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE MAPASTEPEC Y PIJJIAPAN, ESTADO DE CHIAPAS. Realizado en 1981 por Servicios Geológicos, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).** Sus actividades de campo más importantes fueron el censo de

aprovechamientos, muestreo de agua subterránea para análisis fisicoquímicos, reconocimientos hidrogeológicos y ejecución de sondeos eléctricos verticales, con el objetivo de ubicar sitios favorables para la perforación de pozos.

**ESTUDIOS TÉCNICOS JUSTIFICATIVOS PARA EL ORDENAMIENTO DE 15 ACUÍFEROS EN LOS QUE SE SUSPENDIÓ LA CONDICIÓN DE LIBRE ALUMBRAMIENTO CON DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, DE LOS CUALES 14 SON PARCIALMENTE VEDADOS, DEL ORGANISMO DE CUENCA FRONTERA SUR DE LA CONAGUA, EN LOS ESTADOS DE CHIAPAS Y TABASCO. ACUÍFERO SOCONUSCO. Realizado en 2014 por Proyectos, Estudios y Servicios en Ciencias e Ingeniería Agrícolas, S.A. de C.V. (PRESENCIA) para la Comisión Nacional del Agua.** El estudio tuvo como objetivo principal identificar las causales de interés y utilidad públicos para sustentar la necesidad del ordenamiento jurídico requerido. Consideró además actividades de campo como censo parcial de aprovechamientos, piezometría, muestreo de agua subterránea para análisis fisicoquímicos y planteamiento del balance de aguas subterráneas.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, AFOROS, HIDROMETRÍA Y CALIDAD DEL AGUA EN EL ACUÍFERO SOCONUSCO, ESTADO DE CHIAPAS. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Frontera Sur, 2019.** Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, así como la información de calidad del agua.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincias fisiográficas**

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964) el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Tierras Altas de Chiapas. La subprovincia Sierra de Chiapas o Sierra Madre de Chiapas es una cadena montañosa que consiste de rocas graníticas con orientación noroeste sureste, continuación del Macizo Montañoso de Centroamérica formado por un batolito Paleozoico, sobreyacida en algunos lugares por rocas volcánicas del Terciario. En su extremo noroeste se presentan elevaciones bruscas en las montañas alcanzando alturas del orden de los 900 m que aumentan gradualmente hacia el sureste cerca de la frontera con Guatemala a 2,900 m, denominado "Macizo Granítico-Metamórfico de Chiapas". Es una franja alargada paralela a la línea de costa que se extiende por todo el estado de Chiapas. La cresta de esta cordillera representa el parteaguas de las vertientes del Golfo de México y del Océano Pacífico. El flanco suroccidental es de laderas muy abruptas sobre las que las corrientes superficiales descienden impetuosamente hacia la planicie costera del Pacífico. La Planicie Costera del Pacífico se caracteriza por ser una amplia llanura que probablemente antes de su estado fue afectada por transgresiones marinas,



con una topografía subterránea conformada por formaciones volcánicas de composición básica. En ella se localizan zonas agrícolas muy fértiles.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI, se localiza en las Provincias Fisiográficas Cordillera Centroamericana, subprovincia Sierras del Sur de Chiapas y las Discontinuidades Llanura del Istmo y Llanura Costera de Chiapas y Guatemala.

La Provincia Cordillera Centroamericana inicia en el Istmo de Tehuantepec y se extiende en dirección sureste hasta la República de Nicaragua, atravesando los territorios de Guatemala, Honduras y El Salvador, es otro gran batolito ígneo emergido sobre el sitio de subducción de la placa de Cocos. En casi todo Chiapas, el cuerpo intrusivo ígneo está plenamente expuesto, pero a partir del volcán Tacaná, compartido entre México y Guatemala, queda casi todo sepultado por los productos de los numerosos volcanes juveniles de los países centroamericanos. En México abarca parte de los estados de Chiapas y Oaxaca, así como una pequeña porción de Veracruz.

En la Subprovincia Sierras del Sur de Chiapas afloran las rocas graníticas del batolito, integrando sierras de orientación noroeste-sureste que se internan en territorio de Guatemala; sólo al norte de Santiago Niltepec, Oaxaca, se presenta un afloramiento de rocas volcánicas seguido por otro de rocas metamórficas con manchones calcáreos. Esta subprovincia forma parte de la zona conocida regionalmente como Sierra Atravesada.

La Discontinuidad Llanura del Istmo inicia al oeste de Santo Domingo Tehuantepec en Oaxaca y se extiende con rumbo sur-sureste hasta Tonalá, Chiapas; tiene una longitud y un ancho máximo aproximados de 185 y 50 km, respectivamente. El origen de esta llanura costera con línea de costa cóncava hacia el Océano Pacífico, se relaciona tanto con el depósito de materiales del Pleistoceno al Reciente, provenientes de las sierras cercanas, como con procesos de emersión de la zona. Encierra a las lagunas Superior, Inferior y Mar Muerto por medio de barras anchas de bocas estrechas, tiene la particularidad de presentar al norte del Mar Muerto, afloramientos pequeños de rocas ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas. Las discontinuidades Llanura del Istmo y Llanura Costera de Chiapas y Guatemala están separadas por una pequeña sierra, de altitud de 50 msnm, que se desprende del macizo cristalino y llega hasta los poblados La Polka y Tres Picos cercanos a la línea de costa, donde el ancho de la planicie es muy reducido.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima que predomina en la superficie baja



del acuífero, en una franja orientada en sentido noroeste-sureste, es de tipo cálido subhúmedo, en sus variantes  $Aw_2$ , que ocupa la mayor parte de la superficie, el más húmedo dentro de este tipo; y  $Aw_1$ , con humedad intermedia. Ambas variantes presentan un régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2% del total anual, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm y la relación entre precipitación y temperatura (P/T) entre 43.2 y 55.3.

Conforme se asciende topográficamente, el clima se vuelve cálido húmedo Am, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5 al 10.2% del total anual; semicálido húmedo (A)C(m) del grupo C, con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. En una pequeña zona del extremo noroccidental se presenta clima (A)C(w2) semicálido subhúmedo del grupo C, con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 8 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie media y baja de la cuenca, que contienen registro para el periodo 1963-2005: Tapanatepec, Arriaga, Tonalá, Horcones, Tres Picos, Jesús Chiapas, Pijijiapan y Margaritas. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **2048.0 mm, 27.9 °C y 2430 mm**, respectivamente.

### **3.3. Hidrografía**

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH)23 "Costa de Chiapas". Subregión Hidrológica del mismo nombre, Cuenca Mar Muerto y Otros y Río Pijijiapan y Otros. Las subcuencas hidrológicas ubicadas en esta zona son las de los ríos Las Arenas, La Punta, Mar Muerto, Zanatenco, Laguna de la Joya, Jesús, El Porvenir, San Diego, Pijijiapan y Margaritas. El límite norte del acuífero coincide con el parteaguas entre las regiones hidrológicas Costa de Chiapas y Grijalva-Usumacinta, justo en las elevaciones más altas de la subprovincia fisiográfica denominada Sierra Madre de Chiapas o Macizo Granítico de Chiapas; al oriente limita con la cuenca Río Margaritas, al poniente con la cuenca Río Las Arenas y al sur con el límite del Océano Pacífico. Todo el escurrimiento superficial es drenando hacia los ríos que desembocan al Océano Pacífico y que tienen un recorrido promedio aproximado de 65 km en dirección norte-sur.

### **3.4. Geomorfología**

La unidad geomorfológica conformada por la sierra cristalina, comprende una serie de elevaciones topográficas que se presentan en una gran extensión de la región sur y suroeste de la zona. En conjunto presenta una orientación NW-SE, y formas ligeramente redondeadas. El flanco NW de las sierras desciende con una pendiente relativamente suave, a diferencia del flanco SW que se presenta más abrupto posiblemente debido a la existencia de bloques a fallados; las rocas que la constituyen son de composición granítica y edad paleozoica. Desde el punto de vista del ciclo geomorfológico, se considera que se encuentra en etapa de juventud debido a que sus corrientes superficiales son muy erosivas.

La zona comprende las planicies, lagunas, esteros y manglares. En general, se trata de una planicie costera con una amplitud variable de 15 a 20 km, de poco relieve, que se encuentra en un periodo de estabilización, lo cual se confirma por las planicies aluviales y barras que se han formado. La planicie es interrumpida por algunas elevaciones montañosas intermedias de origen intrusivo y metamórfico con alturas del orden de 200 a 500 msnm.

El relieve de la región está dominado por dos unidades geomorfológicas principales: planicie costera y sierra de Chiapas. La planicie costera corresponde a una franja alargada orientada noroeste-sureste, paralela a la costa, que tiene un ancho que varía de 20 a 50 km, con pendiente de baja a moderada. En los límites de la planicie con las sierras el terreno tiene una cota media de 250 msnm, con algunos lomeríos de rocas graníticas alteradas que se elevan hasta 300 msnm y a 50 m sobre la planicie; de donde desciende con una pendiente moderada para posteriormente, con una cota media de 80 msnm, continuar hacia la costa con pendiente baja. El sistema de drenaje es esencialmente paralelo y en dirección noreste-suroeste, en el que su densidad está en relación con la pendiente. En la zona de pendiente moderada, es más denso, mientras que, en la mayor parte de la planicie costera, de pendiente más suave, la densidad de drenaje es baja. La zona se caracteriza por la presencia de corrientes divagantes que han formado una gran cantidad de meandros.

La Sierra de Chiapas corresponde a un cordón de forma alargada orientada en dirección paralela a la línea de costa y a la planicie costera; se considera que es una prolongación del macizo montañoso de América Central que corresponde a un batolito del Paleozoico Superior. El Flanco oeste de la sierra presenta pendientes mayores. Su parte alta alcanza altitudes de más de 2,800 msnm y en aproximadamente 12 km sus flancos descienden a alturas de 250 msnm. Presenta drenaje dendrítico denso.

#### 4. GEOLOGÍA

A nivel regional el basamento de la región está conformado por un complejo metamórfico prebatolítico denominado por Weber et al., (2001) como Unidad La Sepultura, que se presenta como colgantes dentro del macizo de Chiapas, constituido por ortogneis, augengneis, paragneis, migmatita, mármol cipolino y anfibolita, en que se reportan edades Cámbrico-Devónico determinadas por el método Rb-Sr en roca total, mientras que el Macizo de Chiapas está constituido por metagranitos, metagranodiorita y metadiorita de edad Pérmico-Triásico. Las unidades que conforman la Cuenca Paleozoica de Chiapas están expuesta al nororiente de la región, conformando el anticlinorio de Comalapa y son: Grupo Chuacus constituido por esquistos, filitas y cuarcitas de edad Carbonífero Inferior; Formación Santa Rosa, conformada por pizarras, filitas y metacalizas de edad Carbonífero Superior-Pérmico (figura 2).

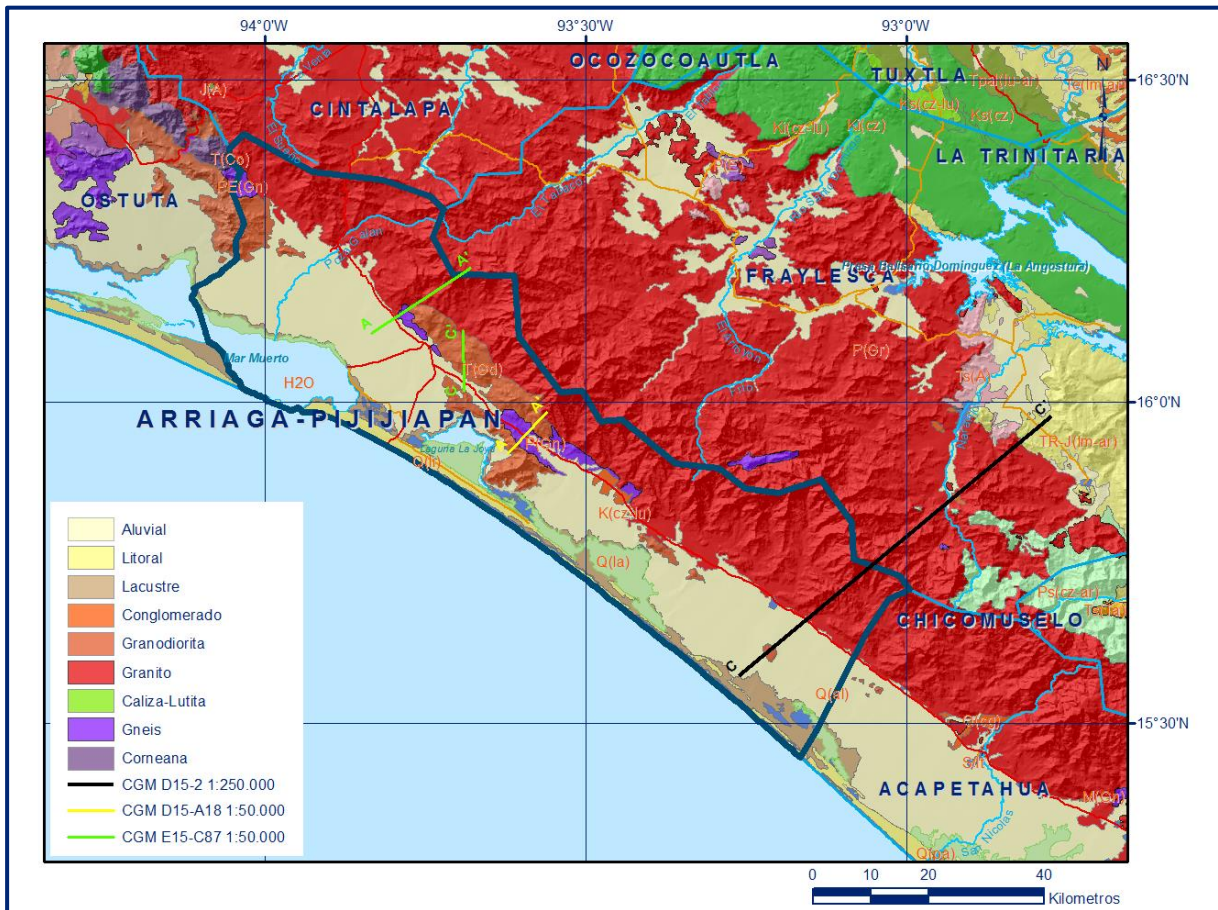


Figura 2. Geología general del acuífero

Le sobryace la Formación Grupera representada por una alternancia de lutitas y calizas de edad Pérmico. Sobryaciendo en concordancia paralela y transicional se encuentra la Formación Paso Hondo, que consiste de calzas y dolomías de edad Pérmico. Las unidades aflorantes en la provincia geológica Sierra de Chiapas son: Formación Todos Santos, la cual cubre indistintamente a las unidades paleozoicas, y consiste de una

alternancia de limolitas, areniscas y conglomerados polimícticos, con intercalaciones de lutitas; la cual es cubierta discordantemente por la Formación Sierra Madre conformada por calizas y dolomías. Esta unidad está cubierta de manera concordante y transicional por la Formación Angostura constituida por calizas con intercalaciones de lutitas, de edad Campaniano-Maastrichtiano. Una serie de afloramientos que se encuentran paralelos a la línea de costa, se interpretan como correspondientes al magmatismo de la Sierra Madre del Sur, representado principalmente por granodioritas y un pórfido andesítico que sólo fue observado en las inmediaciones del poblado Tolimán, en donde intrusión a las rocas del Macizo de Chiapas.

El vulcanismo del Mioceno es de tipo fisural y aflora en la porción nororiental y consiste de tobas riolíticas-dacíticas que cubre parcialmente tanto a las rocas del Macizo de Chiapas al noreste de Motozintla como a las formaciones Sierra Madre, Angostura, Todos Santos y Santa Rosa. En el Cuaternario ocurre el vulcanismo que da origen a la toba riolítica expuesta en la carretera Motozintla y Frontera Comalapa, lahares y brechas volcánicas andesíticas, que afloran en la región media del volcán Tacaná. Los depósitos continentales cuaternarios están representados por el aluvión que aflora en la franja paralela a la costa, así como en los valles y ríos de la porción central y norte, depósitos palustres que se localizan en toda la planicie costera, lacustres que afloran de manera aislada, y litorales que están presentes a lo largo de la línea de costa (Carta Geológico-Minera Huixtla D15-2. Escala 1:250,000. SGM, 2005).

#### **4.1. Estratigrafía**

En la región en la que se ubica el acuífero aflora una secuencia estratigráfica constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuya edad comprende del Paleozoico al Reciente. A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas, comenzando con la más antigua.

#### **PALEOZOICO**

##### **Complejo Basal**

Con el nombre de Complejo Basal Ígneo-Metamórfico, se le designa al conjunto de rocas cristalinas y metamórficas que conforman el núcleo de la Sierra de Chiapas; a dicho basamento le subyace una potente secuencia de rocas sedimentarias de edad paleozoica-mesozoica. En esta secuencia está incluida la Unidad Sepultura (Weber et al., 2001) que se presenta como colgantes dentro del Macizo de Chiapas, constituido por metagranitos, metagranodiorita y metadiorita de edad Pérmico-Triásico.

##### **Grupo Chuacús**

En el Terreno Tectonoestratigráfico Maya, en la cuenca Paleozoica de Chiapas, el basamento cristalino está representado por el Grupo Chuacús, constituido por una

secuencia de rocas metamórficas de bajo grado a intermedio, originadas por metamorfismo regional en facies de esquistos verdes a anfibolita. Comprenden esquistos de color gris verdoso, pardo rojizo a pardo amarillento, de estructura y textura foliada compacta-foliada. Incluye además cuarcitas que se caracterizan por sus clastos de cuarzo cementados por una matriz silícea y en algunas localidades contienen pirita diseminada. Su edad corresponde al Cámbrico.

### **Formación Santa Rosa**

Su porción inferior se conoce como Formación Aguacate y está constituida por pizarras, filitas, calizas marmorizadas y esquistos que presentan diferentes grados de metamorfismo. Su espesor se ha calculado en 1,000 m, medido al sureste del estado de Chiapas, específicamente en Chicomuselo. Discordantemente le sobreyace la Formación Santa Rosa Superior, constituida por lutitas intercaladas con arenas y calizas, con un espesor de 100 m, que afloran al noreste de la región.

### **Formación Grupera**

Está conformada por 410 m de lutitas intercaladas con calizas fosilíferas. Las lutitas se encuentran dispuestas en estratos de 10 hasta 100 cm, por sus características se le ha identificado en un ambiente de depósito de plataforma somera con variaciones de alta y baja energía. Descansa de manera concordante sobre las formaciones anteriores, al noreste del río Aguacate se observa en discordancia angular con los lechos rojos de la Formación Todos Santos.

### **Formación Paso Hondo**

Conformada por calizas con alto contenido de fósiles, dispuestas en estratos de 10 hasta 80 cm de espesor, con un espesor total promedio estimado de 950 m.

## **JURÁSICO**

### **Formación Todos Santos**

También conocida como Capas o Lechos Rojos Todos Santos. Está conformada en su base por una potente secuencia de areniscas rojas de grano grueso a muy grueso, que presenta fragmentos de granito, rocas efusivas y metamórficas, en estratos de 1 a 3 m de espesor. En la región aflora en la zona de Cintalapa. Al norte de Cintalapa existe un derrame andesítico inmerso entre los lechos rojos, evidenciando que es contemporáneo a ellos y que fueron el origen del aporte del material ígneo efusivo que contiene dicha formación. Al oriente de Cintalapa los Lechos Rojos junto con las capas de la Formación San Ricardo se acuñan y desaparecen bajo las calizas del Cretácico Medio, para aflorar nuevamente al sur-sureste de Tuxtla Gutiérrez.

## **CRETÁCICO**



## **Formación Sierra Madre**

Conformada por calizas que se caracterizan por estar parcialmente marmorizadas. Se ha dividido en tres Miembros: Cantelhá, Cintalapa y Jolpabuchil, restringiendo el miembro Cantelhá al Cretácico Medio y Jolpabuchil al Cretácico Superior. Con el nombre Cantelhá se identifica a un cuerpo de dolomitas que afloran sobre el río Cantelhá, mientras que con el término Jolpabuchil se conoce a una secuencia de calizas con pedernal depositadas en mares abiertos, posiblemente de plataforma externa.

Miembro Cantelhá. Tiene un espesor de 420 m y es la unidad más desarrollada dentro de la sierra, aflora en una franja orientada de NW-SE a lo largo del homoclinal de la sierra y en las culminaciones de las estructuras del altiplano. Está constituida por dolomitas con intercalaciones de calizas que permiten suponer un ambiente de depósito de plataforma interna de baja energía. Subyace a las calizas Cintalapa y cubre en concordancia al Cretácico Inferior.

Miembro Calizas Cintalapa, Aflora desde el río Chalchijapan, al noreste de Tuxtla, hasta la frontera con Guatemala, presenta un espesor promedio de 750 m, que fueron medidos al norte de Cintalapa. Se caracteriza por una estratigrafía bien definida con intercalaciones de dolomita y calizas dolomíticas, que se hacen más abundantes hacia el oriente de Tuxtla Gutiérrez. Por sus características litológicas se puede inferir que se depositaron en un ambiente de plataforma, de escasa profundidad, más somera al este y noroeste de la actual ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Miembro Jolpabuchil. Se encuentra constituido por calizas con estratificación media a delgada, con la presencia de bandas y nódulos de pedernal con un espesor promedio de 190 m hasta alcanzar 1,400 m al sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

## **Formación Angostura**

Representa una secuencia de sedimentos calcáreos del Cretácico Superior, con intercalaciones de lutitas, que afloran en la depresión central y en el altiplano Chiapaneco. El nombre se adoptó de la localidad situada al sureste de Tuxtla Gutiérrez, en las márgenes del Río Grijalva. Esta formación aflora en la depresión central, desapareciendo hacia el noroeste del estado.

## **TERCIARIO**

A este periodo pertenecen tobas riolíticas-dacíticas que cubren parcialmente tanto a las rocas del Macizo de Chiapas como a las formaciones Sierra Madre, Angostura, Todos Santos y Santa Rosa. Durante el Oligoceno-Mioceno se emplazó el Macizo Ígneo del Soconusco, cuya litología consiste de granodioritas, cuarzomonzonitas, segregaciones básicas dioríticas y gabroicas, afectado por diques irregulares de composición aplítica de espesor reducido. También se observan numerosos xenolitos de grano fino constituidos

por minerales máficos. Las granodioritas se encuentran en contacto tectónico con las rocas ígneas del Macizo de Chispas por medio de la falla Motagua.

## **CUATERNARIO**

Está representado los depósitos de aluvión que rellenan los valles, ríos y arroyos de la zona, constituidos por arcillas, limos, arenas y gravas, producto de la desintegración de rocas volcánicas. En la zona costera, a esta unidad pertenecen también los depósitos palustres, constituidos por arcillas, limos, arenas y materia orgánica en descomposición; los depósitos lacustres compuestos por sedimentos finos depositados en pequeñas lagunas someras separadas del mar por un cordón litoral y los depósitos de litoral conformados por arenas finas a gruesas, sujetos al oleaje del mar, que forman franjas paralelas a la costa.

### **4.2. Geología estructural**

El proceso desarrollado en un régimen dúctil consiste en milonitización, foliación y crenulación; el primero se observa a lo largo de franjas paralelas asociadas a la zona de la falla Polochic-Motagua, con una orientación NW 50°-75° SE, que afecta principalmente a las rocas del Macizo de Chiapas y a la granodiorita del Mioceno. La foliación y crenulación se desarrollaron principalmente en rocas del Grupo Chuacus, en la Formación Santa Rosa y en la Unidad Sepultura. La deformación dúctil-frágil está representada por pliegues y cabalgaduras, en la región de Chicomuselo se encuentra el anticlinorio Comalapa (De la Rosa Z.J.L. et al., 1989), consistente de una serie de anticlinales y sinclinales paralelos con una marcada orientación NW50°SE, dentro de los cuales se encuentran los sinclinales Comalapa, Zacualpan, Chicharras, Frontera y Guerrero; y los anticlinales Cárdenas, La Noria, Platanal, Guadalupe, Pacayal y Pacalyalito. Las cabalgaduras son: Paxtal, que se caracteriza por la sobre posición de la Formación Santa Rosa y el Grupo Chuacus sobre el Macizo de Chiapas; Los Aires y San Nicolás que sobreponen a la Formación Santa Rosa sobre la Formación Todos Santos; Motozintla y Agua Caliente que afectan solamente a rocas del macizo de Chiapas; y Achotal que sobrepone a la Formación Santa Rosa sobre las formaciones Gruperá y Paso Hondo. Con respecto a la deformación frágil, está representada por fallamiento normal y lateral; las fallas normales son: San Juan, Canadá, La Cumbre, Honduras, Pablo Galena, Cambil, Pavincul, Noviembre y El Loro; y las laterales son: La Campana, Pijijiapan, Custepec, Tres de Mayo, Madero, Bella Vista, Laguna del Cofre, Nueva Lucha, San Luis, Los Olivos, Benito Juárez, Zapote, La Hacienda, Achotal, La Pinada, Siltepec, Llano Grande, Mozotal, Mazapa, Soledad, Agua Caliente y Zaragoza.

La evolución tectónica de la región está relacionada a bloques paleozoicos o precámbricos pertenecientes a cinturones orogénicos más antiguos, que fueron disgregados durante el rompimiento de Pangea y anexados a las márgenes del Pacífico



mexicano y del Caribe. De acuerdo con la teoría de los Terrenos Tectonoestratigráficos, la región forma parte de los Terrenos Maya y Chortis (Sedlock R.L., et al., 1993 y Campa U.M.F., et al., 1983) (Carta Geológico-Minera Huixtla D15-2. Escala 1:250,000. SGM, 2005).

Las rocas metamórficas han sido relacionadas con un evento metamórfico contemporáneo con la fase grenvilliana de deformación. Posterior a este evento se instauro un geosinclinal en la región norte de América Central con una orientación general este-oeste. Los sedimentos fueron deformados e intrusionados en un intervalo de deformación del Devónico. Durante el Cenozoico Tardío, la región fue afectada por fallas normales y corrimientos laterales; que se encuentran por lo general relacionadas con la tectónica y se asocian al desplazamiento de las placas Norteamericana-Caribe, a lo largo del sistema de fallas Polochic-Motagua de Guatemala y sur de México; este sistema de fallas aparece en la serie de afloramientos de granodiorita ubicados en la porción norte del acuífero.

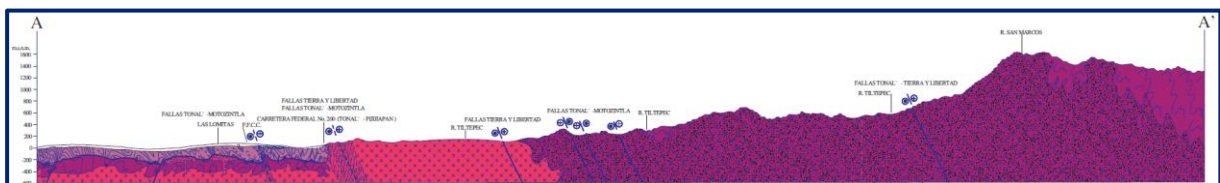
#### 4.3. Geología del subsuelo

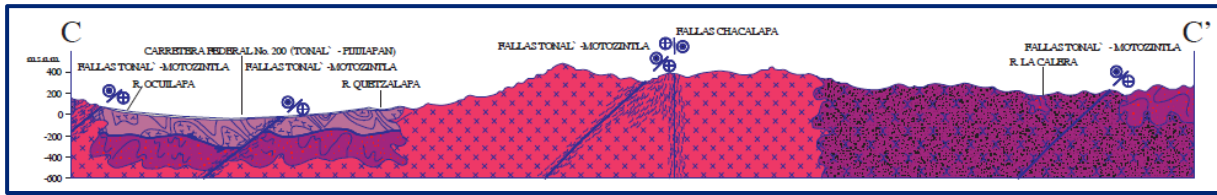
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Arenas, La Punta, Zanatenco, Jesús, San Diego, Pijijiapan y Margaritas, así como depósitos litorales, lacustres y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos aluviales y conglomeráticos tienen algunas centenas de metros de espesor (figura 3).

La porción inferior se aloja en la parte alterada de rocas las intrusivas y metamórficas. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas, intrusivas y metamórficas al desaparecer el fracturamiento.

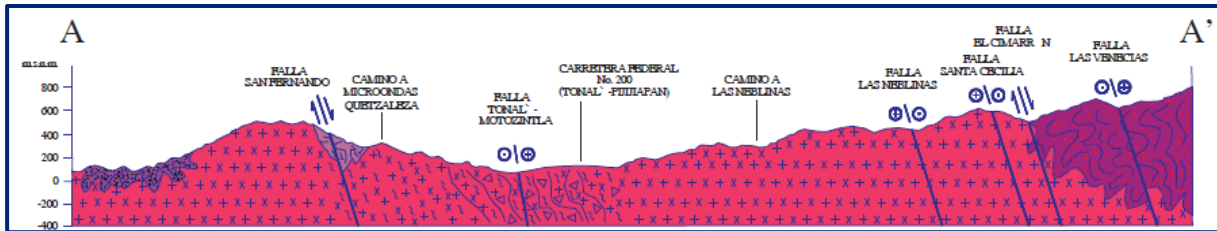


FUENTE: Carta Geológico-Minera D15-2 "Huixtla" Escala 1:250.000 (SGM, 2005).





FUENTE: Carta Geológico-Minera E15-C87 "Tonalá" Escala 1:50.000 (SGM, 2009).



FUENTE: Carta Geológico-Minera D15-A18 "Tres Picos (Los Cocos)" Escala 1:50.000 (SGM, 2009)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

A partir de la información geológica e hidrogeológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero, así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Arenas, La Punta, Zanatenco, Jesús, San Diego, Pijijiapan y Margaritas, así como depósitos litorales, lacustres y conglomerados, que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en la parte alterada de rocas intrusivas y metamórficas que presentan permeabilidad por fracturamiento.

### 5.2. Parámetros hidráulicos

No existe información reciente de pruebas de bombeo. Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero en explotación, se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que fueron realizadas en estudios previos, tanto en este acuífero como en los vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían de **2.0 x10<sup>-4</sup> a 50.0 x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s (17.3 a 4320 m<sup>2</sup>/día)**. La conductividad hidráulica varía de **0.6 a 181.4 m/d (6.9 x10<sup>-6</sup> a 2.1 x10<sup>-3</sup> m/s)**. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos

de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Para fines del balance de aguas subterráneas, se adoptó un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de **0.1** de acuerdo a la constitución geológica.

### **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con registros históricos durante el periodo 2004-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2017.

### **5.4. Comportamiento hidráulico**

#### **5.4.1. Profundidad al nivel estático**

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron desde menos de 1 m en la zona costera y de las lagunas, hasta 5 m, los cuales se incrementan gradualmente por efecto de la topografía de la planicie costera y del cauce de los ríos, hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 2 m, se registraron en la porción costera, en la zona que bordea al Mar Muerto y las lagunas La Joya, El Mosquito y otras. Los valores de profundidad de 5 m se presentan hacia el contacto de los depósitos aluviales con las rocas intrusivas, desde Arriaga, pasando por Tonalá y Tres Picos hasta Pijijiapan (figura 4).

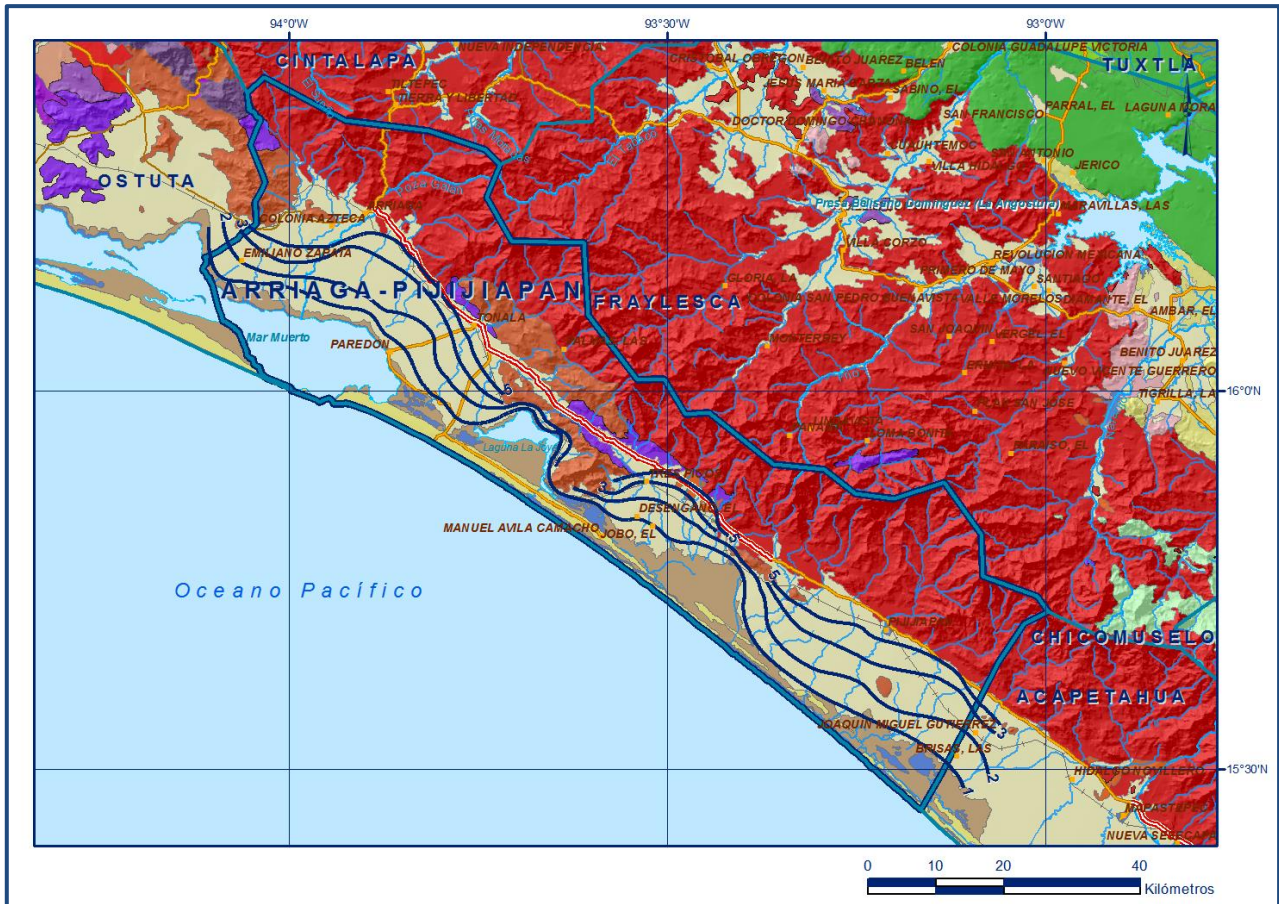


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 3 a 60 msnm, que se incrementan de la planicie costera y del cauce de los ríos Las Arenas, Zanatenco, Jesús, San Diego y Pijijiapan, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan los valles. Los valores más altos, 30 a 60 msnm, se registran en el extremo noroccidental del acuífero, hacia Arriaga, Tonalá y Tres Picos, desde donde descienden gradualmente hacia el sur-suroeste por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la planicie costera y hacia las lagunas y hacia el Mar Muerto. Los menores valores de carga hidráulica, de 3 a 5 msnm, se presentan en toda la zona costera desde el poblado Emiliano Zapata en la porción noroccidental, hasta Las Brisas en el extremo suroriental, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo noreste-suroeste, paralela a la dirección del escurrimiento superficial (figura 5).





Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registró valores de abatimiento y de recuperación; los primeros varían de 1 a 2 m, es decir 0.1 a 0.4 m anuales, que se registraron entre Arriaga y Paredón; con valores puntuales de 4 m, 0.4 m anuales, al norte de Emiliano Zapata. Las recuperaciones varían de 1 a 3 m, que representan 0.1 a 0.3 m anuales, y se presentan entre Pijijiapan y la Laguna El Mosquito. Valores muy locales de 7 m, 0.7 m anuales, se observaron al sur de Arriaga (figura 6). En la mayor parte de la superficie de explotación del acuífero, los niveles del agua subterránea no mostraron cambios en su posición; como consecuencia, las excedencias se manifiestan en forma de descargas naturales: flujo base de los ríos, descarga de manantiales, evapotranspiración en la zona de niveles freáticos someros y por flujo subterráneo hacia el mar.



Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2014, se tomaron 3 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, metales pesados y orgánicos: pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), coliformes totales y fecales, iones principales, aluminio, arsénico, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo, dureza, fenoles, fluoruro, fierro, manganeso, mercurio, nitratos, nitratos, nitrógeno amoniacal, plaguicidas, clordano, 4,4-DDT, lindano, hexaclorobenceno, heptacloro, epóxido de heptacloro, metoxicloro, 2,4-D, plomo, sustancias activas al azul de metileno, trihalometanos totales, y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores extremos de concentración de SDT varían de 103 a 180 mg/l, por lo que no superan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido por 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. Los parámetros cuyas concentraciones superan los LMP establecidos en la norma referida para consumo humano son coliformes y fierro. La concentración de coliformes

fecales encontrados en el agua subterránea varía de 4 a 110 NMP/100ml, valores que superan el LMP no detectable, establecido por la norma referida; la concentración de fierro en una muestra de agua subterránea es de 0.344 mg/l, por lo que rebasa el LMP para consumo humano de 0.3 mg/l establecido en la norma referida.

De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 147.3 a 225  $\mu$ S/cm. El pH del agua subterránea varía de 6.66 a 7.2.

Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, predomina la familia bicarbonatada cálcica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como C1-S1, que representa agua de salinidad baja, apta para el uso agrícola sin restricciones en el tipo de cultivo, ni de suelos.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA**

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2000, complementada con con información de 2022 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDa), se registró la existencia de 3,839 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 200 son pozos, 3548 norias y 1 manantial; todos activos. Del total de aprovechamientos, 215 son para uso agrícola, 74 para abastecimiento de agua potable, 2 para uso pecuario, 18 para servicios, 5 para uso industrial y 3525 para uso doméstico.

El volumen de extracción estimado es de **50.0 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 38.5 hm<sup>3</sup> (77.0 %) son para uso agrícola, 8.5 hm<sup>3</sup> (17.0%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades, 1.1 hm<sup>3</sup> (2.2%) para uso doméstico-pecuario, 0.4 hm<sup>3</sup> (0.8%) para uso industrial, 0.4 hm<sup>3</sup> (0.8%) para servicios y 1.1 hm<sup>3</sup> (2.2%) para usos múltiples.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en un área de balance de **1,300 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se tiene 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:

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

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

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

### **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 y arroyos 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; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Debido a que el volumen de agua subterránea para uso público-urbano es pequeño, sólo se considera la recarga incidental debida a los retornos del riego agrícola.

#### **7.1.1 Recarga vertical (Rv)**

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V(S)$ ) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

$$\mathbf{Rv + Ri + Eh - B - Sh - Dfb - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)}$$

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal

- Ri:** Recarga Incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dfb:** Descarga por flujo base de ríos
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

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

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

### 7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

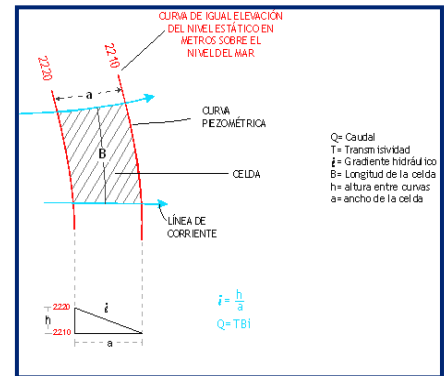
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella 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:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q:** Caudal ( $m^3/s$ )
- T:** Transmisividad ( $m^2/s$ )
- B:** Longitud de la celda (m)
- i:** Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **31.2 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	6237	2192	20	0.00912	0.0020	0.1138	3.6
E2	10046	2835	20	0.00705	0.0020	0.1417	4.5
E3	6872	1842	10	0.00543	0.0015	0.0560	1.8
E4	10448	1619	10	0.00618	0.0015	0.0968	3.1
E5	3709	1673	10	0.00598	0.0015	0.0333	1.0
E6	5183	1805	5	0.00277	0.0015	0.0215	0.7
E7	4884	2263	30	0.01326	0.0020	0.1295	4.1
E8	4012	1468	5	0.00341	0.0015	0.0205	0.6
E9	4888	1780	10	0.00562	0.0020	0.0549	1.7
E10	7712	3708	10	0.00270	0.0030	0.0624	2.0
E11	8208	5198	10	0.00192	0.0050	0.0790	2.5
E12	7595	3696	10	0.00271	0.0030	0.0616	1.9
E13	7502	3239	10	0.00309	0.0050	0.1158	3.7
<b>TOTAL</b>							<b>31.2</b>

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 de la región donde se localizan las celdas.

### 7.1.3. Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego 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 las 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 de láminas de riego por cultivo, se considera que el 30% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 38.5 hm<sup>3</sup> de agua subterránea; al aplicar el 30% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 11.6 hm<sup>3</sup>. Por tanto, **Ri = 11.6 hm<sup>3</sup> anuales.**

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros, a través de manantiales (Dm) y por flujo base de ríos (Dfb).

### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **50.0 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **8.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	11267	867	2	0.00231	0.0010	0.0260	0.8
S2	9511	1112	2	0.00180	0.0010	0.0171	0.5
S3	5557	1176	2	0.00170	0.0020	0.0189	0.6
S4	14544	1117	2	0.00179	0.0010	0.0260	0.8
S5	10524	1154	2	0.00173	0.0005	0.0091	0.3
S6	6641	829	2	0.00241	0.0010	0.0160	0.5
S7	6909	1750	2	0.00114	0.0010	0.0079	0.2
S8	7234	1149	2	0.00174	0.0015	0.0189	0.6
S9	5452	909	2	0.00220	0.0010	0.0120	0.4
S10	6028	813	2	0.00246	0.0010	0.0148	0.5
S11	5166	816	2	0.00245	0.0020	0.0253	0.8
S12	12023	1240	2	0.00161	0.0020	0.0388	1.2
S13	9822	2120	2	0.00094	0.0020	0.0185	0.6
S14	8032	1590	2	0.00126	0.0010	0.0101	0.3
S15	6675	1586	2	0.00126	0.0010	0.0084	0.3
<b>TOTAL</b>							<b>8.4</b>

### 7.2.3. 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 considera 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.

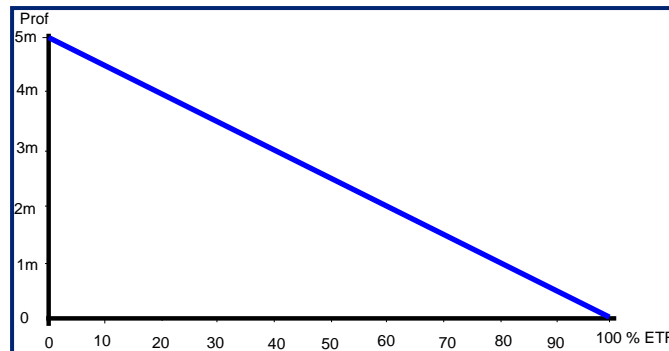
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 27.9 °C y 2048 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 1499.1 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	27.9		
P(mm) =	2048.0	P <sup>2</sup> =	4194304
L =	2083.38195	L <sup>2</sup> =	4340480.35
ETR (mm)	1499.1		

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 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 = 1179.8 hm<sup>3</sup>/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
1	1.0	399.4	1.4991	5.0	0.8	479.0
1 a 2	1.5	349.0	1.4991	5.0	0.7	366.2
2 a 3	2.5	358.3	1.4991	5.0	0.5	268.6
3 a 5	4.0	220.2	1.4991	5.0	0.2	66.0
<b>TOTAL</b>		<b>1326.9</b>				<b>1179.8</b>

#### 7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de las estaciones hidrométricas Coapa, Pijijiapan, Urbina, San Diego, Jesús, Ocuilapa y Tonalá; proporcionada por el Organismo de Cuenca Frontera Sur, los ríos Coapa, Pijijiapan, Urbina, San Diego, Jesús, Ocuila y Zanatenco, respectivamente, registraron un caudal estimado de 0.74, 0.27, 0.10, 0.54, 0.95, 0.31, 0.46 m<sup>3</sup>/s de flujo base, respectivamente en el estiaje (febrero a abril) para un periodo mínimo 1974-2011, que representa un volumen de 23.4, 8.5, 3.2, 16.9, 30.0, 9.9 y 14.4 hm<sup>3</sup> anuales, respectivamente. Por lo tanto, el flujo base conjunto de los ríos es **Dfb = 106.4 hm<sup>3</sup> anuales.**

#### 7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y = 0.1$  se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -0.4hm<sup>3</sup>, es decir, un promedio anual de **-0.0hm<sup>3</sup>.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	ΔV(S) (hm <sup>3</sup> /año)
7	7.0	6.7	0.1	4.7
3	3.0	15.5	0.1	4.7
0.5 a 1.0	0.8	125.6	0.1	9.4
0 a 1	0.5	115.0	0.1	5.8
0 a -1	-0.5	207.4	0.1	-10.4
-1	-1.0	108.6	0.1	-10.9
-4	-4.0	9.3	0.1	-3.7
	<b>TOTAL</b>	<b>588.1</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-0.4</b>
		<b>Promedio anual</b>		<b>0.0</b>

### Solución a la ecuación de balance

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

$$R_v = S_h + B + D_{fb} + ETR - E_h - R_i \pm \Delta V(S)$$

$$R_v = 8.4 + 50.0 + 106.4 + 1179.8 - 31.2 - 11.6 - 0.0$$

$$R_v = 1301.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 1301.8 + 31.2 + 11.6$$

$$R = 1344.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

## 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:

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



Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero  
**R** = Recarga total media anual  
**DNC** = Descarga natural comprometida  
**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### **8.1. Recarga total media anual (R)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **1344.6 hm<sup>3</sup>/año**.

### **8.2. Descarga natural comprendida (DNC)**

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

Para el caso del acuífero Arriaga-Pijijiapan, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de 1058.6 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 8.4 hm<sup>3</sup> corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar, 106.4 hm<sup>3</sup> al flujo base de los ríos Coapa, Pijijiapan, Urbina, San Diego, Jesús, Ocuila y Zanatenco, y 943.8 hm<sup>3</sup> al 80% del volumen de evapotranspiración que se compromete para protección de los ecosistemas costeros, ribereño y de los sitios RAMSAR. **DNC = 1058.6 hm<sup>3</sup> anuales.**

### **8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)**

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **58'388,773 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 1344.6 - 1058.6 - 58.388773 \\ \text{DMA} &= 227.611227 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **227'611,227 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Arriaga-Pijijiapan, estado de Chiapas.

Comisión Nacional del Agua. 2014. Estudios técnicos justificativos para el ordenamiento de 15 acuíferos en los que se suspendió la condición de libre alumbramiento con disponibilidad de aguas subterráneas, de los cuales 14 son parcialmente vedados, del Organismo de Cuenca Frontera Sur de la CONAGUA, en los estados de Chiapas y Tabasco. Acuífero Arriaga-Pijijiapan. Realizado por Proyectos, Estudios y Servicios en Ciencias e Ingeniería Agrícolas, S.A. de C.V. (PRESENCIA).

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Frontera Sur, 2019. Información piezométrica, aforos, hidrometría y calidad del agua en el acuífero Arriaga-Pijijiapan, estado de Chiapas.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SAH), 1972. Informe del estudio geohidrológico preliminar de la zona del río Ostuta, Oaxaca. Realizado por HIDROTEC, S. A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Mapastepec y Pijijiapan, estado De Chiapas., Oaxaca. Realizado por Servicios Geológicos, S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 2005. Carta Geológica-Minera D15-2 "Huixtla". Escala. 1:250.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2009. Carta Geológica-Minera E15-C87 "Tonalá". Escala. 1:50.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2009. Carta Geológica-Minera D15-A18 "Tres Picos (Los Cocos)". Escala. 1:50.000.