



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO HUATULCO (2011), ESTADO DE  
OAXACA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
<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.....	12
4.2 Geología estructural.....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	17
<b>5. HIDROGEOLOGÍA .....</b>	<b>17</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	17
5.2 Parámetros hidráulicos.....	18
5.3 Piezometría.....	18
5.4 Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>22</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>22</b>
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	24
7.1.3 Recarga incidental (Ri).....	25
7.2 Salidas.....	25
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	25
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	26
7.2.3 Bombeo (B).....	28
7.2.4 Descarga por flujo base de ríos (Dfb).....	28
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	28
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>29</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	29
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>32</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 Huatulco, definido con la clave 2011 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo sur del estado de Oaxaca, entre los paralelos 15°40'51" y 16°13'40" de latitud norte, y entre los meridianos 96°00'10" y 96°35'56" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2,366 km<sup>2</sup>. Limita al norte con los acuíferos Miahuatlán y Tehuantepec, al este con el acuífero Santiago Astata, al oeste con el acuífero Colotepec-Tonameca, todos ellos pertenecientes al estado de Oaxaca. Al sur su límite natural es el Océano Pacífico (Figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende totalmente los municipios Santa María Huatulco, Santa María Ozolotepec, San Miguel Suchixtepec, San Pedro El Alto, San Marcial Ozolotepec, San Francisco Ozolotepec, Santiago Xanica y San Mateo Piñas; parcialmente los municipios San Sebastián Río Hondo, San Mateo Río Hondo, San Pedro Pochutla, San Miguel del Puerto, San Juan Ozolotepec, San Pedro Mixtepec, Santo Domingo Ozolotepec y Pluma Hidalgo; así como pequeñas porciones de los municipios Candelaria Laxicha y San Agustín Laxicha.

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

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

ACUIFERO 2011 HUATULCO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	96	7	19.5	15	57	29.0	
2	96	5	42.9	15	56	38.0	
3	96	5	31.8	15	55	22.7	
4	96	3	52.6	15	54	22.6	
5	96	0	40.9	15	50	53.1	
6	96	0	9.7	15	48	32.1	DEL 6 AL 7 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
7	96	27	42.1	15	41	1.2	
8	96	27	45.3	15	42	28.1	
9	96	29	34.7	15	44	13.3	
10	96	28	36.5	15	46	22.0	
11	96	25	19.3	15	48	53.2	
12	96	24	27.4	15	52	14.2	
13	96	25	5.3	15	56	23.0	
14	96	27	57.8	15	57	52.2	
15	96	31	32.2	15	58	45.1	
16	96	35	54.7	16	1	28.6	
17	96	29	38.6	16	10	39.5	
18	96	22	14.9	16	11	23.5	
19	96	20	40.0	16	13	40.2	
20	96	15	28.9	16	11	42.9	
21	96	10	47.1	16	13	0.1	
22	96	5	49.5	16	10	9.9	
23	96	8	1.5	16	3	37.9	
24	96	7	29.0	16	1	29.3	
1	96	7	19.5	15	57	29.0	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Sur y al Consejo de Cuenca Costa de Oaxaca, instalado el 7 de abril de 1999. En su territorio completo no rige ningún decreto de veda para la extracción del agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el 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 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 es el público-urbano. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. 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 territorio costero se localiza el Parque Nacional Huatulco, decretado el 24 de julio de 1998, y el sitio Ramsar Cuencas y Corales de la Zona Costera de Huatulco, decretado el 27 de noviembre de 2003,

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

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. A continuación, se describen los más importantes:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN BAHÍAS DE HUATULCO, OAXACA. Elaborado en 1982 por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S. A., para la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP).** Su objetivo fue conocer con mayor precisión el espesor de los rellenos aluviales en los valles, mediante investigaciones hidrogeológicas y geofísicas para cuantificar el potencial del acuífero y recomendar su óptima explotación. Concluye que el subálveo del Río Copalita es la zona que presenta mejores posibilidades por el espesor de los depósitos aluviales que alcanzan hasta 20 m, saturados con agua de buena calidad

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO (COMPLEMENTO) EN BAHÍAS DE HUATULCO, OAXACA. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A., para FONATUR, en 1985.** El objetivo de este estudio fue localizar las fuentes de abastecimiento de agua para las diferentes bahías del desarrollo turístico de Huatulco y definir el número de obras, su localización y diseño.

**ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUÍFEROS DEL ESTADO DE OAXACA. Realizado en 2010 para la Comisión Nacional del Agua por la Universidad Autónoma Chapingo.** El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO HUATULCO, OAXACA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019.** Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

### **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 Sierra Madre del Sur. Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del INEGI (1989), se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur; el extremo norte en las Subprovincias Cordillera Costera del Sur y Sierras Orientales; en tanto que la porción centro y sur se ubican en la Subprovincia Costas del Sur.

La Provincia Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles considerables. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, lugar en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm. Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas. Es la provincia de mayor complejidad geológica, debido a la presencia de rocas sedimentarias, ígneas y la mayor abundancia de rocas metamórficas del país. El choque de las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana, provocó el levantamiento de esta sierra y determina en gran parte su complejidad.

La Subprovincia Cordillera Costera del Sur se extiende en sentido noroeste-sureste, desde el sur de la ciudad de Colima hasta el oriente de Pluma Hidalgo, Oaxaca, a lo largo de la zona de subducción de la Placa de Cocos a cuyos desplazamientos a través del tiempo debe su origen y evolución. En la porción oaxaqueña dominan rocas metamórficas del Precámbrico, rocas ígneas intrusivas del Mesozoico hacia el norte, noroeste y oeste de Santa Catarina Juquila, así como sedimentarias del Terciario en la zona de Santiago Juxtlahuaca y del Cretácico al norte y este de Putla Villa de Guerrero.

La Subprovincia Sierras Orientales es un sistema montañoso que forma parte del extremo oriental de la Sierra Madre del Sur y comprende parte de los estados de Puebla, Veracruz y Oaxaca; se extiende en dirección noroeste-sureste desde la región de Orizaba, Veracruz, hasta las proximidades de Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. La porción norte, en el estado de Veracruz, llamada Sierra de Zongolica, es algo menos abrupta que el resto y en ella predominan las rocas calcáreas del Cretácico que le dan afinidad con la Sierra Madre Oriental. Desde la proximidad de San Juan Bautista Valle Nacional hasta la cañada del río Tehuantepec, se conoce como Sierra Mixe; es más alta y escarpada que la de Zongolica, con cumbre máxima de 3,280 m en el cerro Zempoaltépetl ubicado al noreste de Santa María Tlahuitoltepec; su litología es muy compleja, con rocas metamórficas, aluviones antiguos y, en su porción sur, rocas ígneas ácidas y algunos afloramientos calcáreos

Por su parte, la Subprovincia Costas del Sur comprende la angosta llanura costera del Pacífico, que está orientada más o menos en sentido noroeste-sureste, desde las cercanías de la desembocadura del río Coahuayana, en el límite entre Colima y Michoacán, hasta Salina Cruz, Oaxaca, pasando por el estado de Guerrero. Está conformada por sierras, llanuras y lomeríos; las primeras se localizan a lo largo del límite norte de la subprovincia, se aproximan al litoral cerca de San Pedro Pochutla y Salina Cruz y están constituidas predominantemente por rocas metamórficas precámbricas, aunque en el oriente se encuentran rocas metamórficas y sedimentarias del Cretácico, ígneas intrusivas del Mesozoico e ígneas extrusivas del Terciario. Las llanuras se encuentran a lo largo de la faja costera, cubiertas por suelos del Cuaternario principalmente; y los lomeríos se ubican entre las sierras y las llanuras, y sólo dos de las unidades llegan al litoral, una en Puerto Ángel y otra en Barra de La Cruz.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en región es cálido subhúmedo con lluvias en verano, el cual comprende toda la zona costera desde el límite con el estado de Guerrero hasta el límite con Chiapas. En este tipo de clima la temperatura media anual es mayor de 22°C y la temperatura del mes más frío mayor de 18°C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm; presenta régimen lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Conforme se asciende topográficamente, se presenta las variantes Aw(1),Aw(2) y (A)C(w2), semicálido subhúmedo del grupo C. En estos dos últimos tipos de clima el índice P/T es mayor de 55. El clima (A)C(w2) presenta temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm. En el extremo nororiental el clima es de tipo C(w2) templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C; precipitación en el mes más seco menor de 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 11 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie de explotación del acuífero, que contienen registros para diferentes periodos: Puerto Ángel, San Isidro, San Pedro Pochutla, Santa María Huatulco, Pluma Hidalgo, Candelaria, El Tapanal, San Mateo Río Hondo, San Francisco Ozolotepec, La Hamaca y Santa María Xadani. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **893.0 mm**, **28.1°C** y **1,880.5 mm**, respectivamente.

### **3.3 Hidrografía**

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-21 "Costa de Oaxaca", Subregión Hidrológica "Costa de Oaxaca", cuenca de Río Copalita y Otros, subcuencas de los ríos Copalita y San Pedro Pochutla, drenadas por los ríos del mismo nombre, que vierten su caudal en el Océano Pacífico.

La cuenca de Río Copalita y Otros comprende 3.96% del área estatal y ocupa parte de los distritos Pochutla y Miahuatlán; se localiza en el extremo sur del estado y se extiende desde el parteaguas de la Sierra Madre del Sur hasta la línea de costa. Limita al norte con la cuenca Río Tehuantepec (B) de la RH-22, al sur con el Océano Pacífico, al este con la cuenca Río Astata y otros (A), al oeste con la cuenca Río Colotepec y otros (C), ambas de la RH-21. Esta cuenca es una de las que con mayor frecuencia sufre los embates de tormentas tropicales y huracanes, cuando estos fenómenos se acercan a la línea de costa o entran a tierra firme, producen lluvias torrenciales a lo largo de la costa oaxaqueña.

La hidrografía de la zona está bien definida, los caudales perennes se desarrollan en terrenos de fuerte pendiente, tienen su origen en las partes altas que corresponden

a la sección norte de la cuenca, el desarrollo de la red de drenaje principal es sensiblemente perpendicular a la línea de costa a excepción del Río Copalita que no guarda una dirección definida, otra característica de este río dentro de la cuenca es su magnitud, nace en la Sierra Madre del Sur a 2.800 msnm, sigue en dirección general hacia el sureste en curso zigzagante sobre terrenos de fuerte pendiente, recorre aproximadamente 120 km. Durante su recorrido recibe por margen izquierda a sus afluentes más importantes, entre ellos los ríos San Marcial, Santo Domingo y La Cofradía.

Al norte de Santa María Huatulco, a 1,100 msnm, nace el Río Coyula, en su recorrido rodea al cerro Huatulco para dirigirse al sur hasta desembocar al Océano Pacífico, los ríos Tonameca, Cozoaltepec y Valdeflores tienen desarrollo excepcionalmente corto, llevan volúmenes de agua considerables durante la época de lluvias. En general los ríos de esta cuenca ofrecen balance hidráulico positivo debido al intenso régimen de lluvias que la temporada ciclónica propicia en el área.

### **3.4 Geomorfología**

La característica geomorfológica predominante en la zona es el contraste del relieve por el cambio abrupto de pendiente entre la región norte y los valles intermontanos de relieve muy suave, debido a la resistencia a la erosión de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas de la sierra, comparadas con los suelos y materiales de relleno que forman la planicie. Contrasta también la etapa geomorfológica de madurez que presentan las sierras que ocupan la mayor superficie del área y que no han alcanzado un nivel base de erosión, con la etapa de juventud avanzada que presentan los valles. En la zona norte el relieve es de montañas complejas posiblemente desarrolladas durante el Mesozoico y posteriormente deformadas y afectadas por cuerpos intrusivos, del Jurásico al Mioceno, constituidas principalmente por gneis, migmatita, granito y granodiorita, disectadas por una intensa red de corrientes que han labrado valles y cañones profundos, y en las que el intemperismo ha originado picachos, bloques semiesféricos de grandes dimensiones y acantilados. La porción sur es un conjunto de lomeríos y cerros formados por una intensa erosión fluvial e intemperismo químico, que actuaron sobre rocas intrusivas y metamórficas del Jurásico-Cretácico, además de una planicie costera originada posiblemente por la subsidencia del terreno debido a la influencia de la Placa de Cocos; está conformada por conglomerados y suelos aluviales y lacustres.

Los valles intermontanos están constituidos por sedimentos aluviales derivados principalmente de las rocas ígneas y metamórficas, erosionados, arrastrados por las corrientes y depositados en las partes bajas. Actualmente los valles, están siendo labrados por corrientes de régimen permanente que descienden de las sierras y desembocan en la línea costera del Océano Pacífico, rellenando las lagunas marginales y los esteros.

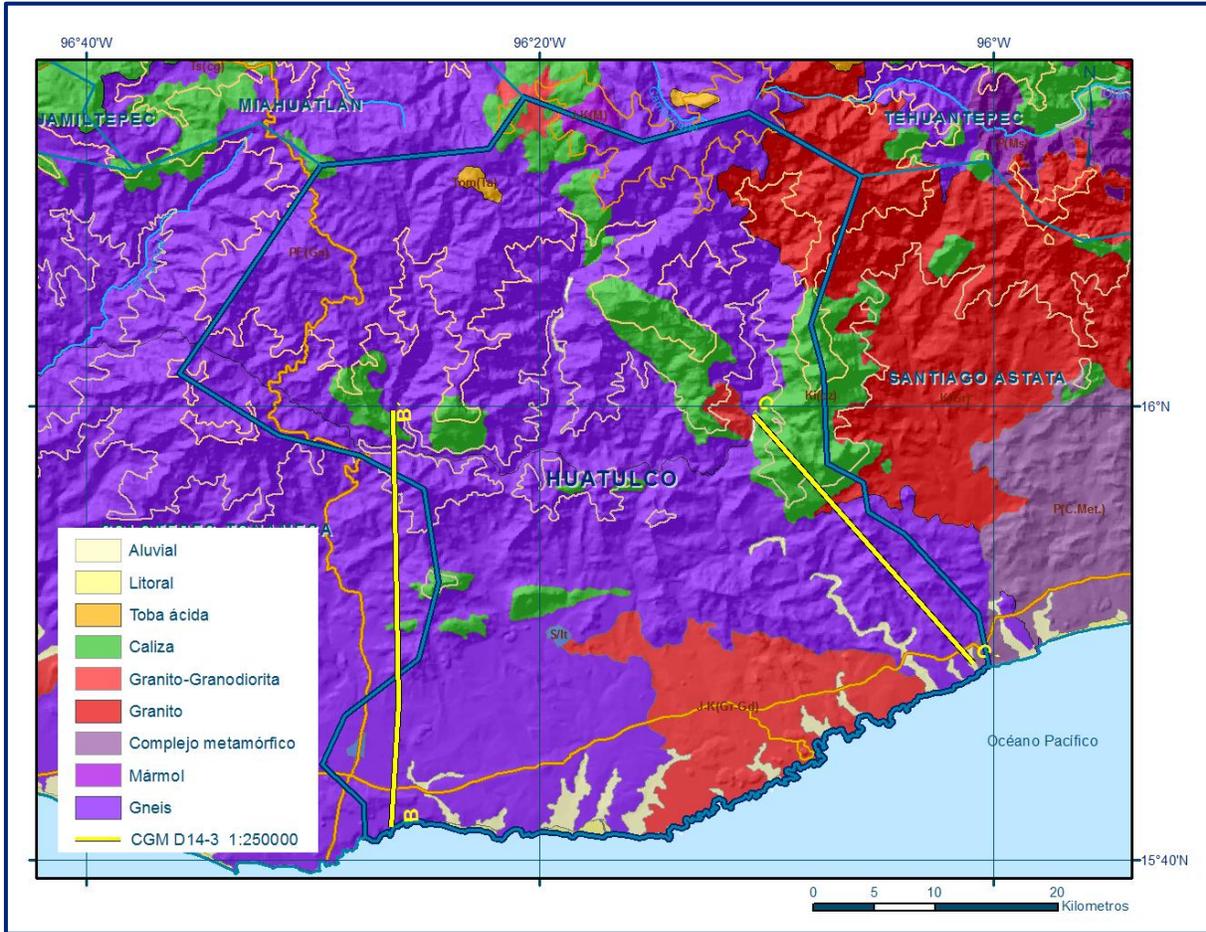
En la zona se identifican tres aspectos geomorfológicos, uno de control litológico, otro estructural y el último deposicional. El primero corresponde a la sierra que forma el batolito granítico que aflora principalmente al norte de la zona, dando lugar a pasajes abruptos de difícil acceso, cortados por abundantes arroyos de control tectónico. La morfología de control estructural la representan dos terrazas formadas por erosión y depósito marino durante el Terciario Superior. Estas terrazas se encuentran a una elevación promedio de 50 a 70 msnm, formando acantilados hacia la zona de costa en roca granítica, o bien, escalones donde predominan las areniscas. El último aspecto lo representan los valles fluviales y los depósitos de litoral que conforman zonas topográficamente uniformes, casi planas, principalmente longitudinales, aproximadamente en dirección norte-sur para los fluviales y este-oeste para los de litoral. La planicie costera es de poca amplitud, aproximadamente 3 km de ancho y unos de 8 km de largo sobre el litoral del Pacífico.

#### **4. GEOLOGÍA**

La región en la que se ubica el acuífero, al igual que toda la porción sur de México, presenta una geología compleja debido a que en ella confluyen 3 elementos tectónicos amalgamados en diferentes momentos geológicos, que son los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983) Xolapa, Oaxaca y Mixteco, relacionados con los complejos metamórficos Xolapa, Oaxaqueño y Acatlán, respectivamente (Figura 2).

En zona en la que se localiza el acuífero Huatulco afloran rocas de los Terrenos Tectonoestratigráficos Oaxaca y Xolapa. El primero está constituido por el basamento más antiguo del sur de México, denominado Complejo Oaxaqueño, representado por una serie de rocas metamórficas como paragneises, ortogneises, anortosita, cuerpos dioríticos y gabroicos, así como cuerpos calcosilicatados y pegmatíticos. Las dataciones realizadas lo ubican en el Proterozoico Medio con edades que varían de 900 a 1,100 Ma, correlacionado con La Provincia Grenvilliana de América del Norte, basándose en su cronología y litología. En la región domina la

litología conformada por grandes cuerpos anortosíticos y de rocas intrusivas ácidas y básicas metamorfoseadas a facies de granulita. La única cobertura sobre este complejo son las rocas carbonatadas de la Formación Teposcolula de edad Albiano-Cenomaniano.



El Terreno Xolapa está constituido esencialmente por el Complejo Xolapa, conformado por gneises cuarzo-feldespáticos y gneises pelíticos, anfibolita, pegmatita, migmatita y algunos horizontes de mármol. Las edades asignadas presentan muchas interrogantes; en esta zona se consideró un rango Proterozoico-Terciario, tomando en cuenta las edades fechadas por diferentes métodos isotópicos; sin embargo, existe consenso acerca de que las edades más consistentes son del Mesozoico, Precámbrico y Paleozoico, que pueden ser las edades de los protolitos en los paragneises y las terciarias por reactivación de los relojes isotópicos debido al plutonismo terciario. Las rocas metamórficas de este complejo se encuentran afectadas por cuerpos intrusivos terciarios; al noroeste aflora el Batolito Río Verde, de composición que varía de granito a granodiorita y tonalita, que están

afectadas por diques de aplita y pegmatita; de acuerdo a dataciones isotópicas este intrusivo es de edad oligocénica. Otros cuerpos intrusivos son el Tronco de Pochutla, de composición granodiorítica que cambia a granito, afectado por cuerpos de pegmatita y diques máficos, fechado por el método U-Pb en zircón obteniendo una edad del Oligoceno; el Tronco Huatulco de composición predominantemente granodiorítica que muestra zonas foliadas y bandeadas, así como milonitas en las regiones cercanas a la Falla Chacalapa; este intrusivo ha sido fechado por diferentes métodos que permiten ubicarlo en el Mioceno. El Tronco Xadani constituido por granodioritas de biotita, afecta intensamente a las calizas de la Formación Teposcolula, generando mármol y brechas; a este cuerpo intrusivo se le asignó una edad del Mioceno. Todos los cuerpos intrusivos mencionados forman parte del cinturón plutónico que aflora a lo largo de la costa del Pacífico, desde Manzanillo hasta el Istmo de Tehuantepec.

Cubren al Complejo Xolapa dos diferentes depósitos cuaternarios: el Conglomerado Puerto Escondido formado por una alternancia de conglomerado polimíctico y arenas poco consolidadas que afloran en las inmediaciones de la costa, a los que se les asignó una edad del Pleistoceno. La otra unidad son depósitos de travertino que se formaron en capas delgadas producto de la disolución del carbonato de calcio de las calizas Teposcolula, a los cuales se les asigna una edad del Holoceno, esta unidad se localiza en el límite de los terrenos Oaxaca y Xolapa. Por último, existen depósitos palustres, de litoral y aluviones, también del Holoceno.

La secuencia Piedras Negras, denominada informalmente, corresponde a una secuencia vulcanosedimentaria milonitizada que aflora de manera paralela a la Falla Chacalapa. Por sus características litológicas, se correlaciona con las rocas del Arco Chontal descrito por Carfantán J.C. (1986), también guarda cierta similitud con una secuencia expuesta al norte de Acapulco denominada Formación Chapolapa; su litología consiste de cuarcita, meta-arcosa, meta-grauvaca, meta-dacita y mármol, que se considera una astilla o cuerpo alóctono muy diferente a los terrenos antes descritos, por lo que cual es tomada en cuenta separada de ellos. (Carta Geológico-Minera Puerto Escondido D14-3. Escala 1:250,000. SGM, 2002).

#### **4.1 Estratigrafía**

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Precámbrico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos aluviales. En la región están presentes diferentes terrenos tectonoestratigráficos, que se clasifican de acuerdo con sus basamentos. La

cubierta incluye rocas volcánicas y sedimentarias probablemente deformadas durante el Jurásico o el Cretácico, calizas del Cretácico Inferior y conglomerados del Cretácico Inferior-Cretácico Superior, así como rocas volcánicas continentales del Paleógeno y Neógeno.

## **TERRENO OAXACA**

### **PRECÁMBRICO**

El Terreno Oaxaca consta de un basamento cristalino conocido como **Complejo Oaxaqueño** (Fries, 1962), conformado por ortogneises cuarzo feldespáticos, paragneises con grafito y mármoles de tipo cipolino, anfibolitas, intrusivos de charnokitas, anortositas, pegmatitas y milonitas, características de una facies de granulita. Existen varias edades isotópicas, aunque variables confirman su edad Proterozoica. Aflora en la región central del estado de Oaxaca, desde el límite con el estado de Puebla hasta la cercanía de Pochutla, con dirección N-NW, definiendo una franja continua, parcialmente cubierta en algunos sitios. Está limitado hacia el occidente por rocas metagraníticas y esquistos del Complejo Acatlán, hacia el sur por gneises, migmatitas y esquistos correlacionables con el Complejo Xolapa, y en la parte meridional por un cuerpo milonitizado con estructura lineal, por la cobertura mesozoica y los terrenos volcánicos terciarios, que se encuentran ampliamente distribuidos en la zona.

### **CRETÁCICO**

#### **Formación Teposcolula**

Conformada por calizas biomicríticas poco fosilíferas de tipo arrecifal, dispuestas generalmente en estratos gruesos que contienen nódulos de pedernal. Son de color gris claro a café claro y parcialmente dolomitizadas. Afloran al norte y este principalmente, en donde se observan de color gris claro a crema que al intemperizarse se vuelve gris blanquecino, textura criptocristalina y compacta. Se le asigna una edad que corresponde al Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano).

## **TERRENO XOLAPA**

### **PRECÁMBRICO**

Presenta un basamento conocido como **Complejo Xolapa** (De Cserna, 1965) constituido por ortogneises y paragneises con migmatitas en intervalos anatexíticos, diques aplíticos y pegmatíticos, mármoles, anfibolitas y esquistos. Consta de dos grandes grupos de rocas cuya unidad más antigua está constituida por paragneises, esquistos pelíticos, esquistos de biotita y cuarcita, cuyos protolitos sedimentarios son interpretados como interestratificaciones de grauwacas, rocas pelíticas y carbonatos.

El segundo grupo es el más ampliamente distribuido y su litología consiste principalmente de ortogneises, anfibolitas y migmatitas en facies de anfibolita. En este grupo se desarrolló un metamorfismo de alto grado y una migmatización a gran escala. La interpretación de su edad ha presentado siempre serias dudas, ya que se han realizado estudios isotópicos con resultados desde Precámbrico hasta Oligoceno-Mioceno (Tolson, 1998); aunque algunas edades terciarias podrían estar relacionadas a emplazamientos plutónicos no deformados con los que concluyó el magmatismo por acreción plutónica contra los terrenos adyacentes; que afectan a este basamento con cuerpos calcoalcalinos de composición generalmente granodiorítica con variaciones a granitos, dioritas, cuarzomonzonitas y cuarzodioritas, que conforman el batolito de la costa.

### **PALEOZOICO-JURÁSICO**

El mismo autor asigna al Paleozoico y Jurásico a la migmatita, gneis y esquisto de facies de anfibolita, que están afectadas por cuerpos intrusivos de granito, granodiorita, tonalita y diorita, desde el Cretácico tardío al Terciarios inferior, que a su vez son intrusionados por diques pegmatíticos.

### **CRETÁCICO**

En este periodo quedan incluidos los mármoles que De Cserna (1965) y Ortega (1981) incluyen en el Complejo Xolapa, que suponen son derivados de rocas pelíticas poco calcáreas, y originados por los cuerpos intrusivos de composición granítico-granodiorítico que causaron el metamorfismo de contacto.

Desde el Cretácico al Reciente, ocurrieron eventos magmáticos en la zona, que hacen incongruentes las edades reportadas por diferentes autores y métodos para la datación de las rocas intrusivas cartografiadas. Esto lleva a la conclusión de que el magmatismo y la intrusión de todos los cuerpos que afectan al Complejo Xolapa, comenzó probablemente desde el Jurásico y continuó quizá hasta el Mioceno.

### **TERCIARIO**

El Terciario Superior está representado por areniscas y horizontes de caliza arenosa de facies litorales, con abundante fauna fósil de foraminíferos, que sobreyacen discordantemente a las rocas intrusivas y metamórficas del Mesozoico.

### **CUATERNARIO**

Está representado por conglomerados de gravas de rocas ígneas y metamórficas, formando terrazas y mesas que cubren discordantemente a las rocas graníticas del

Mesozoico; así como desarrollos de suelos lacustres, aluviales y litorales que configuran planicies en la zona costera.

## **4.2 Geología estructural**

Estructuralmente el Complejo Oaxaqueño ha sufrido una intensa y continua deformación que impide reconocer las características originales de las rocas, también se caracteriza por desarrollar estructuras planares de foliación penetrativa, así como indicadores cinemáticos, “boudinage” y alargamiento de minerales. El estilo morfoestructural del Terreno Xolapa representa una de sus principales características tectónicas regionales y está constituida en gran parte por una serie de megaestructuras de cizalla de mecanismo dúctil-frágil. Las rocas del Complejo Xolapa, comprenden diferentes episodios de deformación que se manifiestan por la presencia de foliación penetrativa con rumbos E-W y con echados al sur, pliegues intrafoliales, isoclinales, disarmónicos, zonas anastomosadas, boudinage, bandeamiento, lineaciones y otros indicadores cinemáticos que definen la dirección del movimiento.

Regionalmente la estructura de mayor importancia es la Falla Chacalapa que representa uno de los contactos más interesantes entre los terrenos cristalinos del sur de México, es el contacto entre los terrenos Oaxaca y Xolapa. En la falla, las rocas de los complejos Oaxaqueño y Xolapa se confunden en un solo cinturón milonítico que tiene un espesor variable que varía de cientos de metros a varios kilómetros. El fechamiento isotópico (Rb-Sr), de uno de los plutones milonitizados permite interpretar una edad tentativa del Cretácico Tardío para la fase principal de la actividad de la falla (Ortega, G.F., et al., 1986). En su extremo hacia Puerto Escondido el contacto es interceptado por el poniente por el “Lineamiento Colotepec” (Ortega, G.F, 1990), que desplaza este límite hacia otra gran falla conocida como Juchatengo, desarrollada más al norte. La Falla Chacalapa es una estructura anastomosada desarrollada en el régimen dúctil que ha sido reactivada en régimen dúctil-frágil y actualmente se encuentra a nivel superficial en el régimen frágil. El estiramiento se observa claramente mediante “boudinage” o estrangulamiento de niveles anfíbolíticos en gneises cuarzo-feldespáticos del Complejo Xolapa. Las fallas Pochutla y Figueroa son muy semejantes en sus características a la Chacalapa, por lo que se consideran del mismo sistema, así como las fallas Mixtepec y Limones, en las que se proponen reactivaciones bajo el régimen frágil.

Con respecto a la deformación puramente frágil, se identifican las fallas Cacalotepec, Hidalgo, Zapotalito y San Isidro, que se localizan hacia el extremo noroeste,

interpretadas como laterales izquierdas que se consideran representativas del régimen de cizalla en frágil, impuesto por la intensa actividad Neotectónica de esta región. El graben Morelos está conformado por dos fallas normales que ponen en contacto a diferentes unidades; su posible origen se debe a un régimen extensivo asociado a la cuña tectónica de la Secuencia Piedras Negras bajo el régimen de esfuerzo distensivo provocado por la exhumación del Complejo Xolapa (Carta Geológico-Minera Puerto Escondido D14-3. Escala 1:250,000. SGM, 2002).

El estilo morfoestructural del Terreno Xolapa representa una de sus principales características tectónicas regionales y está constituida en gran parte por una serie de megaestructuras de cizalla de mecanismo dúctil-frágil. Las rocas del Complejo Xolapa, comprenden diferentes episodios de deformación que se manifiestan por la presencia de foliación penetrativa con rumbos E-W y con echados al sur, pliegues intrafoliales, isoclinales, disarmónicos, zonas anastomosadas, boudinage, bandeamiento, lineaciones y otros indicadores cinemáticos que definen la dirección del movimiento.

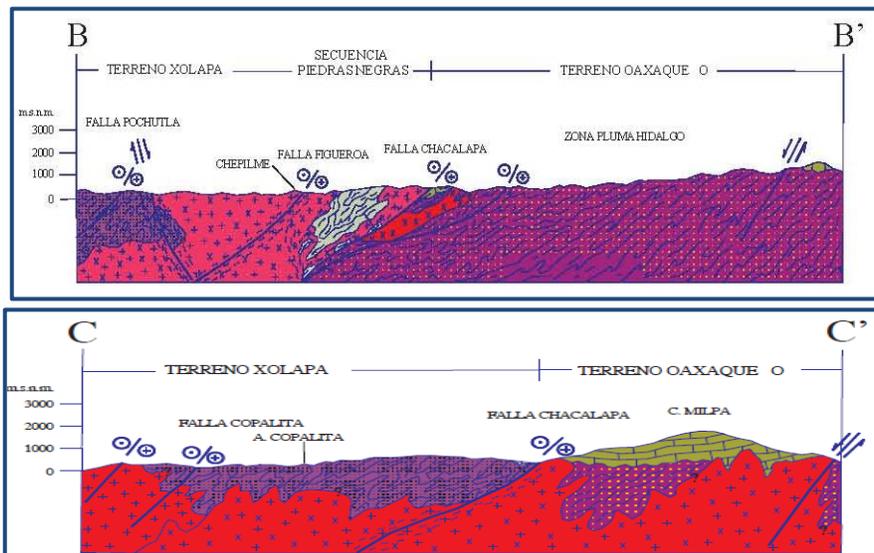
El Complejo Xolapa representa una de las regiones más complejas desde el punto de vista estructural y tectónico. Existe una divergencia en cuanto a la orientación de la foliación entre gneis y esquisto, suponiendo que el primero sea más antiguo, o bien que el contacto entre ellos pudiera ser por falla. Ni en las rocas metamórficas ni en las intrusivas se encontraron estructuras que se relacionan con las de las rocas sedimentarias del Mesozoico, situadas más al norte. El estilo estructural está dominado por la sobreposición de diferentes estructuras de plegamiento y de estructuras de cizalla, con orientación NW-SE. Las fallas y fracturas que se aprecian en la zona pueden haber tenido su inicio por dos causas: 1) Al origen de la Fosa de Acapulco en el Oligoceno por el movimiento lateral izquierdo entre los bloques de América Central y la porción Sur de México, ya que el primero se encontraba ligado a las costas actuales de los estados de Guerrero y Oaxaca para ese tiempo, 2) Por el desplazamiento de la Placa Norteamericana hacia el noroeste sobre los esfuerzos compresionales de la Placa de Cocos al este.

Actualmente la margen pacífica es una zona sísmica activa donde además de registrarse epicentros y focos sísmicos coincidentes con los límites tectónicos, también se ha documentado la presencia de movimientos de bloques, evidenciado por el desplazamiento de fallas normales, inversas y laterales en el área.

### 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 del río Copalita y sus arroyos tributarios, así como depósitos litorales y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen algunas decenas de metros de espesor.

La porción inferior se aloja en la secuencia de rocas intrusivas y metamórficas, cuando se presentan alteradas y con permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas intrusivas y metamórficas al desaparecer el fracturamiento (Figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera Puerto Escondido D14-3. Esc. 1:250.000 (SGM, 2002)

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, de baja capacidad de almacenamiento, 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 del río Copalita y sus arroyos tributarios, así como depósitos litorales y conglomerados que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región, principalmente mediante norias perforadas manualmente que sólo satisfacen las necesidades del uso doméstico-abrevadero. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas intrusivas y metamórficas, cuando se presentan alteradas y con permeabilidad secundaria por fracturamiento.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 3 pruebas de bombeo, 7 más en los acuíferos vecinos Chacahua y Bajos de Chila que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica; todas ellas de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad que varían en un rango muy grande entre  **$8.5 \times 10^{-4}$  y  $8.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (73.4 a 7344  $\text{m}^2/\text{d}$ )**. La conductividad hidráulica varía de  **$35.0 \times 10^{-5}$  a  $1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  (30.2 a 112.3  $\text{m/d}$ )**, valores típicos de permeabilidad de arenas finas a gruesas. 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; en tanto que los más bajos se relacionan con los sedimentos de granulometría más fina y se observan algunas zonas lagunares de la planicie costera.

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, se adoptó un valor de 0.1.

## **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2004, además de registros históricos durante el periodo 2002-2019, 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 2014-2019 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 2019.

## 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 metro que se registran en la zona costera y en las inmediaciones del cauce de los ríos Colotepec, Tonameca y otros ríos y arroyos, hasta 8 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle y a lo largo del cauce de los ríos Copalita y Coyula, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 2 m, se registran en la porción costera; en tanto que las mayores profundidades, de 6 a 8 m, se presentan en las regiones sur y suroriental de la planicie costera y hacia las localidades Bajos de Coyula, Bajos del Arenal y Barra de Copalita (Figura 4).

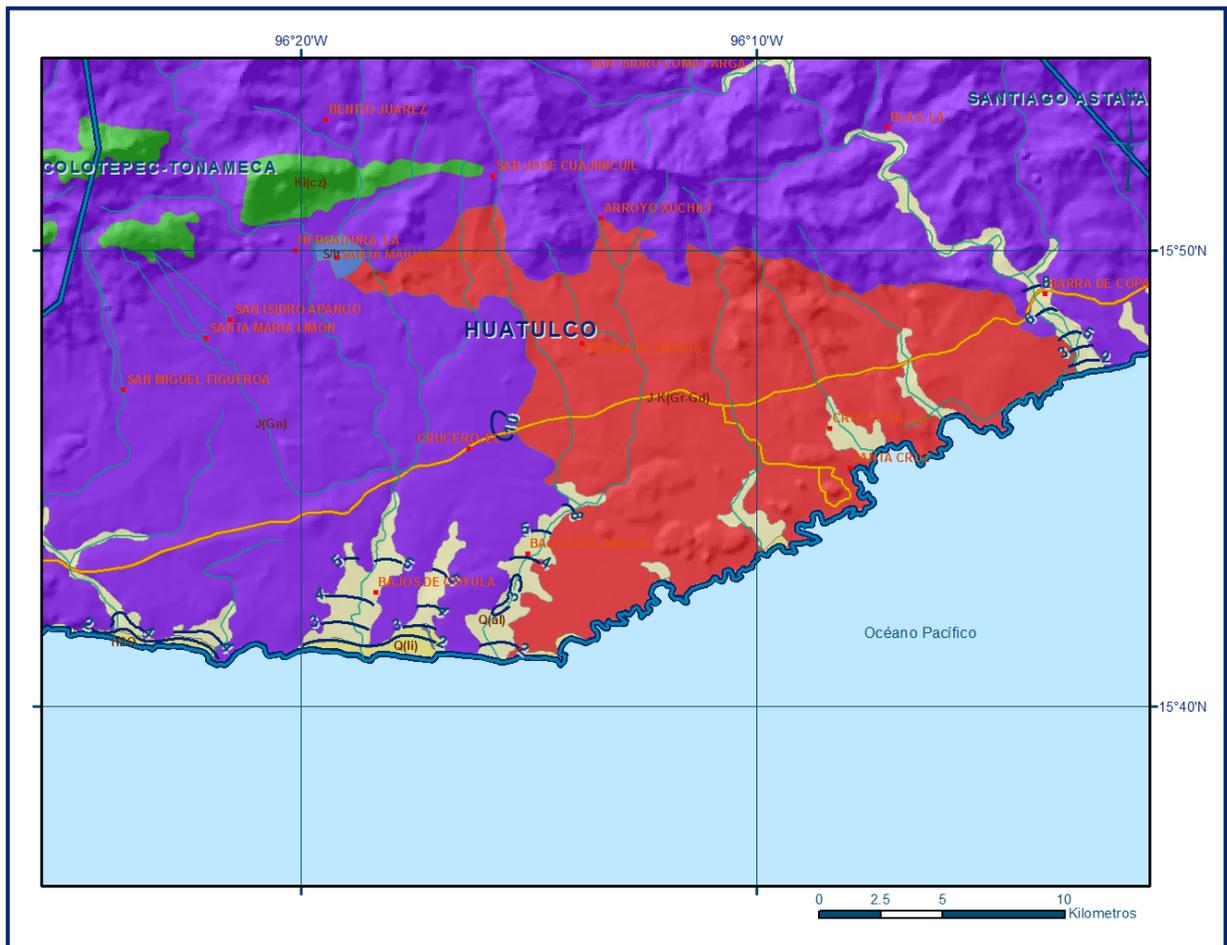


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

### 5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron desde 1 a 30 msnm, que se incrementan de la zona costera y del cauce de los ríos Copalita y Coyula y otros ríos y arroyos, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan los valles. Los valores más altos, se registran hacia el poblado Bajos del Arenal y aguas arriba sobre el cauce de os ríos y arroyos, desde donde descienden gradualmente hacia el sur-suroeste por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la zona costera. Los valores más bajos, menores de 3 msnm, se presentan en toda la zona costera, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur y noroeste-sureste, paralela a la dirección del escurrimiento superficial (Figura 5).

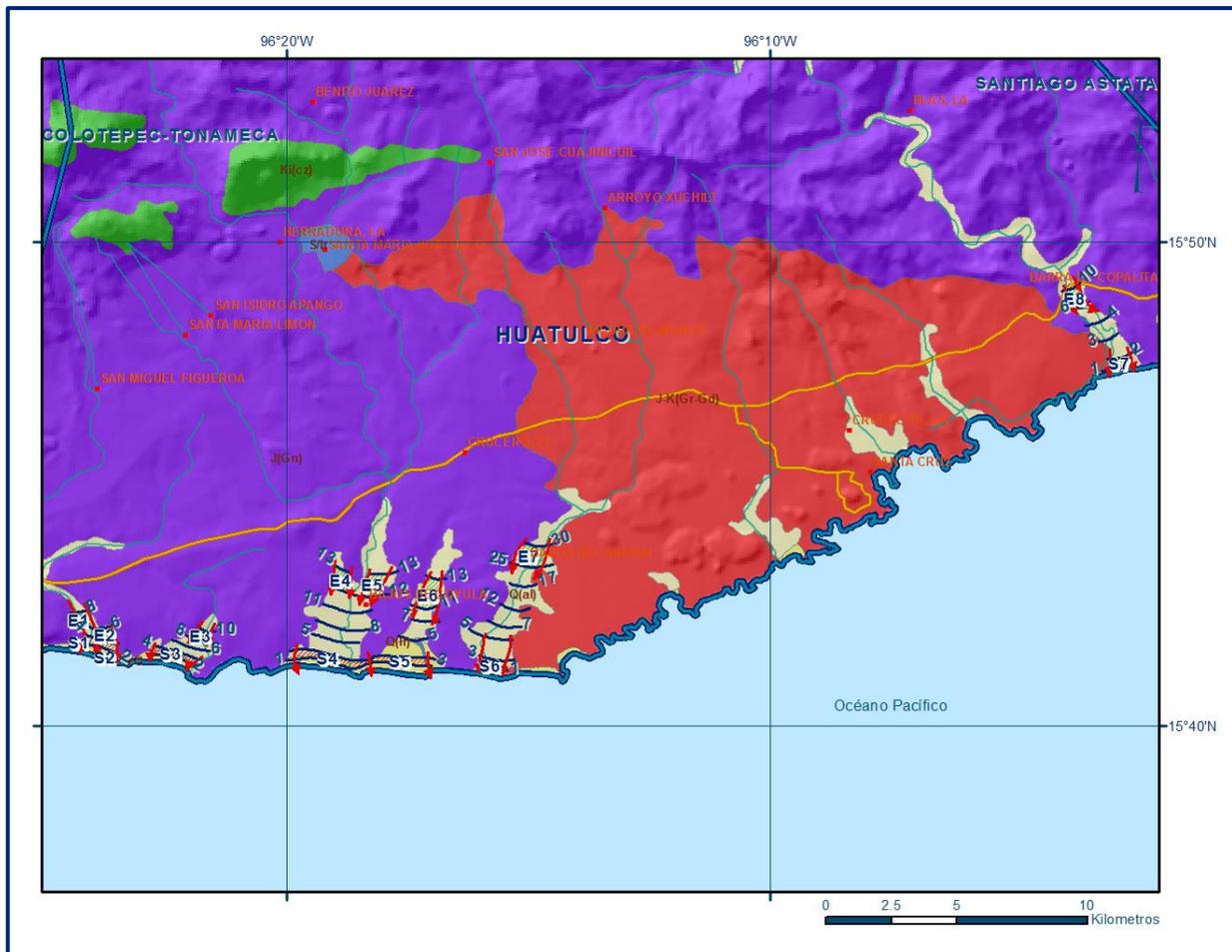


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2019 registró valores de abatimiento de 0.5 a 1.5, que representan 0.1 a 0.3 m anuales, y se presentan a lo largo del cauce de los ríos Copalita, Coyula y otros, hacia los poblados

Barra de Copalita, Bajos de Coyula y Bajos del Arenal; descendiendo gradualmente hacia las estribaciones de los valles, aguas arriba y hacia la zona costera, hasta desaparecer. Abatimientos locales de 3 m, 0.6 m anuales, se midieron en torno del poblado Barra de Copalita (Figura 6).

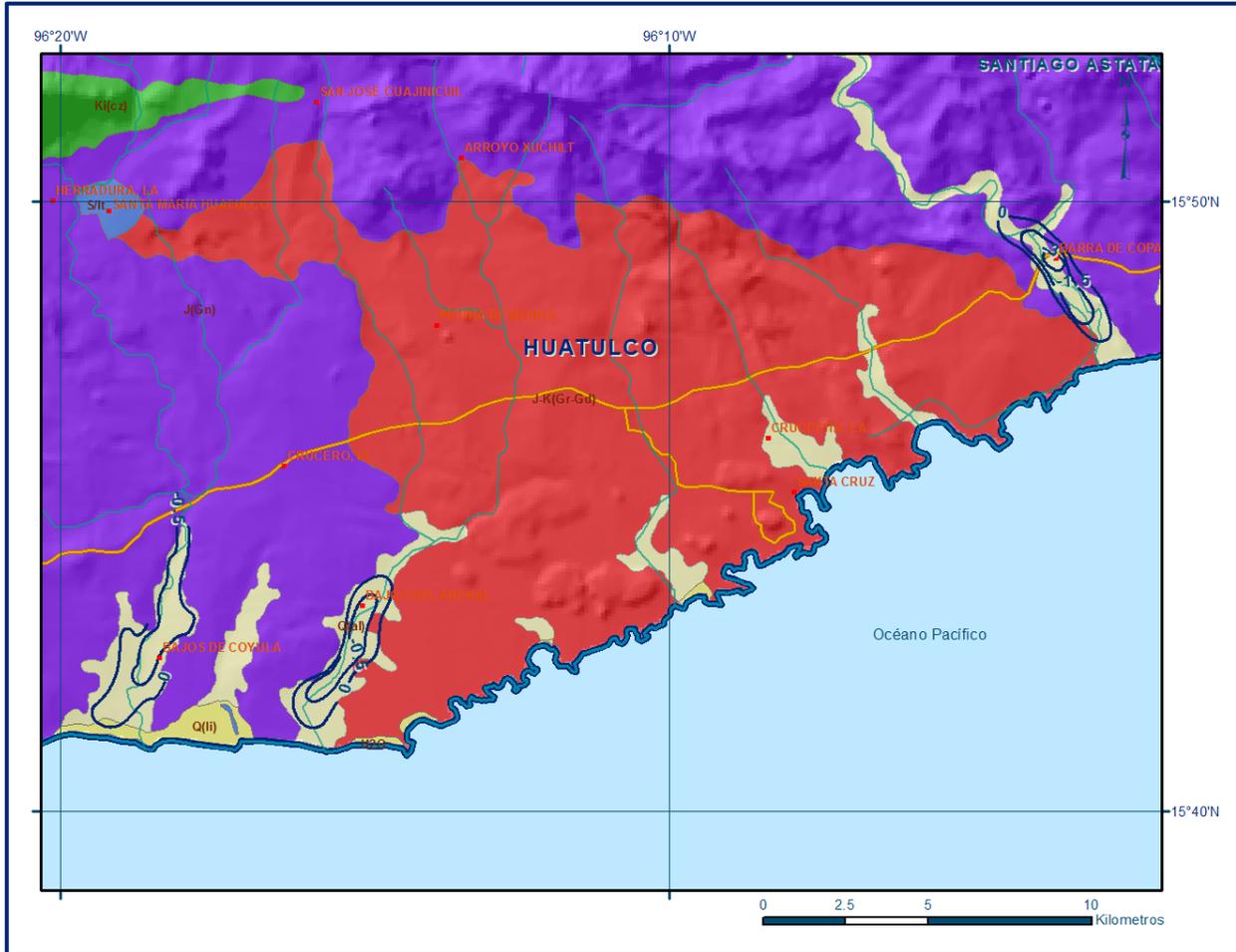


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2014-2019)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2010, se tomaron 14 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc., 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 sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. La concentración de sólidos disueltos totales (SDT) presenta valores que varían de 120 a 418 mg/l, que no sobrepasa el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido en la Norma referida para el agua destinada al consumo humano.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasificó de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 252 a 882  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La temperatura del agua medida directamente a la salida de las obras de captación varió entre 22.0 y 35.2 °C, y el pH de 7.1 y 7.9.

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 de salinidad baja a media (C1 a C2) y contenido bajo (S1) de sodio intercambiable, que es apropiada para su uso en riego sin restricciones en el tipo de suelos y de cultivos. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-sódica-cálcica que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia.

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

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en 2010, se registró la existencia de 70 aprovechamientos de agua subterránea, 51 son norias, 16 pozos y manantiales; de los cuales 67 están activos y 3 inactivos temporalmente; y de acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **7.6 hm<sup>3</sup> anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022, de los cuales 7.1 hm<sup>3</sup> (93.4%) se destinan para dotación de agua potable a las comunidades de la región, 0.4 hm<sup>3</sup> (5.3%) al uso agrícola y 0.1 hm<sup>3</sup> (1.3%) para otros usos.

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

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2014-2019, en un área de balance de **23.6 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona 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:

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

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

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

## **7.1 Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (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 agrícola es pequeño, sólo se considera la recarga incidental debido a las fugas en los sistemas de distribución del agua potable y de las descargas del drenaje.

### **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:

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

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
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

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

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

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

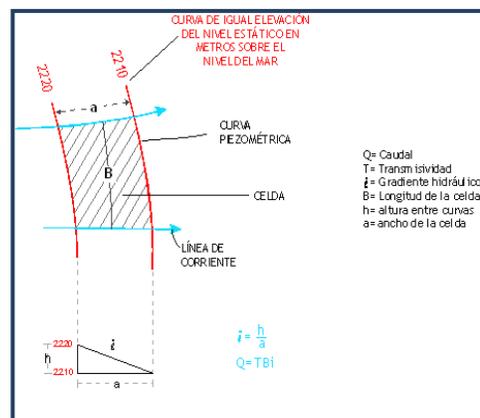
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 **10.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo 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	620	445	2	0.0045	0.0120	0.0334	1.1
E2	515	656	2	0.0030	0.0080	0.0126	0.4
E3	429	555	2	0.0036	0.0150	0.0232	0.7
E4	780	690	1	0.0014	0.0170	0.0192	0.6
E5	915	645	1	0.0016	0.0170	0.0241	0.8
E6	1195	670	2	0.0030	0.0150	0.0535	1.7
E7	855	1085	5	0.0046	0.0170	0.0670	2.1
E8	825	516	4	0.0078	0.0150	0.0959	3.0
<b>TOTAL</b>							<b>10.4</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)

El volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 7.1 hm<sup>3</sup> anuales, tomando en cuenta baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y debido a que la profundidad al nivel del agua subterránea en las zonas urbana y rurales es menor a 10 m, se considera que un 20 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado. De esta manera; el volumen de recarga de este tipo es de 1.4 hm<sup>3</sup> anuales. Por tanto, **Ri = 1.4 hm<sup>3</sup> anuales**.

## 7.2 Salidas

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

### 7.2.1 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 **1.8 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	325	455	2	0.0044	0.0120	0.0171	0.5
S2	275	780	2	0.0026	0.0120	0.0085	0.3
S3	230	1655	2	0.0012	0.0150	0.0042	0.1
S4	260	2830	2	0.0007	0.0150	0.0028	0.1
S5	300	2200	2	0.0009	0.0150	0.0041	0.1
S6	400	920	2	0.0022	0.0170	0.0148	0.5
S7	420	820	1	0.0012	0.0150	0.0077	0.2
<b>TOTAL</b>							<b>1.8</b>

### 7.2.2 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.

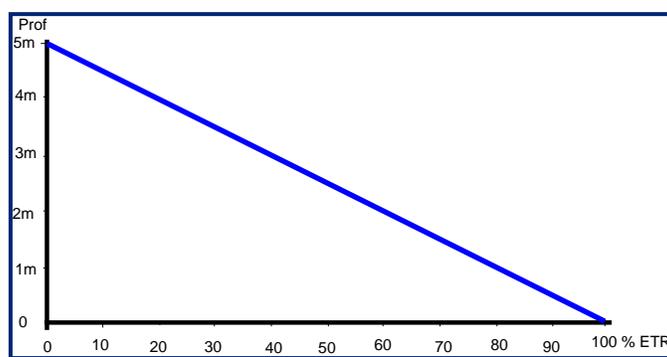
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 28.1 °C y 893.0mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 859.8 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) = 28.1  
 P(mm) = 893      P<sup>2</sup> = 797449  
 L = 2111.90205      L<sup>2</sup> = 4460130.27  
 ETR (mm) = 859.8

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 = 8.1 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)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
2	2	6.2	0.8598	0.6	3.2
3	3	0.6	0.8598	0.4	0.2
3 a 2	2.5	3.0	0.8598	0.5	1.3
4 a 2	3	5.8	0.8598	0.4	2.0
4 a 3	3.5	3.0	0.8598	0.3	0.8
5 a 3	4	0.6	0.8598	0.2	0.1
5 a 4	4.5	5.9	0.8598	0.1	0.5
	<b>TOTAL</b>	<b>25.2</b>		<b>TOTAL</b>	<b>8.1</b>

### 7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **7.6 hm<sup>3</sup>/año**.

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

De acuerdo con la información proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, los ríos Copalita y Coyula presentaron un caudal estimado de 10 lps de flujo base, que representan un volumen de 0.3 hm<sup>3</sup> anuales. Por lo tanto, **Dfb = 0.3 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2019 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:

$\Delta VS$ : 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 - 1.0 hm<sup>3</sup>, es decir, un promedio anual de **- 0.2 hm<sup>3</sup>**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2014-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	S <sub>y</sub>	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-0.5	-0.50	4.6	0.1	-0.2
0 a -0.5	-0.25	5.8	0.1	-0.1
-3	-3.00	0.2	0.1	-0.1
-1.5 a -3	-2.25	1.7	0.1	-0.4
0 a -1.5	-0.75	2.4	0.1	-0.2
	<b>TOTAL</b>	<b>14.7</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-1.0</b>
		<b>Promedio anual</b>		<b>-0.2</b>

## Solución a 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:

$$\begin{aligned}R_v &= S_h + B + ETR + D_{fb} - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \\R_v &= 1.8 + 7.6 + 8.1 + 0.3 - 10.4 - 1.4 - 0.2 \\R_v &= 5.8 \text{ hm}^3/\text{año}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}R &= R_v + E_h \\R &= 5.8 + 10.4 + 1.4 \\R &= 17.6 \text{ hm}^3\text{anuales}\end{aligned}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

**R:** Recarga total media anual

**DNC:** Descarga natural comprometida

**VEAS:** Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **17.6 hm<sup>3</sup>/año**.

## **8.2 Descarga natural comprometida (DNC)**

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

Para el caso del acuífero Huatulco, su valor es **4.1 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 1.8 hm<sup>3</sup> corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia la zona costera, 0.3 hm<sup>3</sup> al flujo base de los ríos Copalita y Coyula, y 2.0 hm<sup>3</sup> al 25% del volumen de evapotranspiración para protección de los ecosistemas costeros y ribereños de los ríos. Por lo tanto, **DNC = 4.1 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 (REPGA), 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 **11'799,564 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

## **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 17.6 - 4.1 - 11.799564 \\ \text{DMA} &= 1.700436 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **1'700,436 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en acuíferos del estado de Oaxaca. Realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.

Comisión Nacional del Agua. 2011. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Huatulco, estado de Oaxaca.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Información piezométrica del acuífero Huatulco, estado de Oaxaca.

Fondo Nacional de Fomento Turismo (FONATUR), 1985. Estudio geohidrológico (complemento) en Bahías de Huatulco. Realizado por Lesser y Asociados, S.A.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), 1982. Estudio geohidrológico en Bahías de Huatulco, Oaxaca. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológica-Minera D14-3 "Puerto Escondido". Escala: 1:250,000.