



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTIAGO-SALAGUA (0609), ESTADO  
DE COLIMA**

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>9</b>
3.1 Provincia fisiográfica.....	9
3.2 Clima.....	9
3.3 Hidrografía.....	10
3.4 Geomorfología.....	10
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
4.1 Estratigrafía.....	13
4.2 Geología estructural.....	17
4.3 Geología del Subsuelo.....	18
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>19</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	19
5.2 Parámetros hidráulicos.....	19
5.3 Piezometría.....	20
5.4 Comportamiento Hidráulico.....	20
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	22
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del Agua Subterránea.....	23
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>25</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>25</b>
7.1 Entradas.....	26
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	26
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	26
7.2 Salidas.....	28
7.2.1 Bombeo (B).....	28
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	28
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	29
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	30
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>32</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	32
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	32
8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas.....	33
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	33
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>34</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 de Santiago-Salagua, definido con clave 0609 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción occidental del estado de Colima, entre los paralelos 19° 05' y 19°15' de latitud norte y entre los meridianos 104° 08' y 104° 26' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 262 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el acuífero Minatitlán, al este con el acuífero El Colomo, al sureste con el acuífero Jalipa-Tapeixtles, al oeste con los acuíferos Marabasco y La Central-Peña Blanca, pertenecientes al Estado de Colima; al sur y suroeste su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, se localiza totalmente dentro del municipio de Manzanillo.

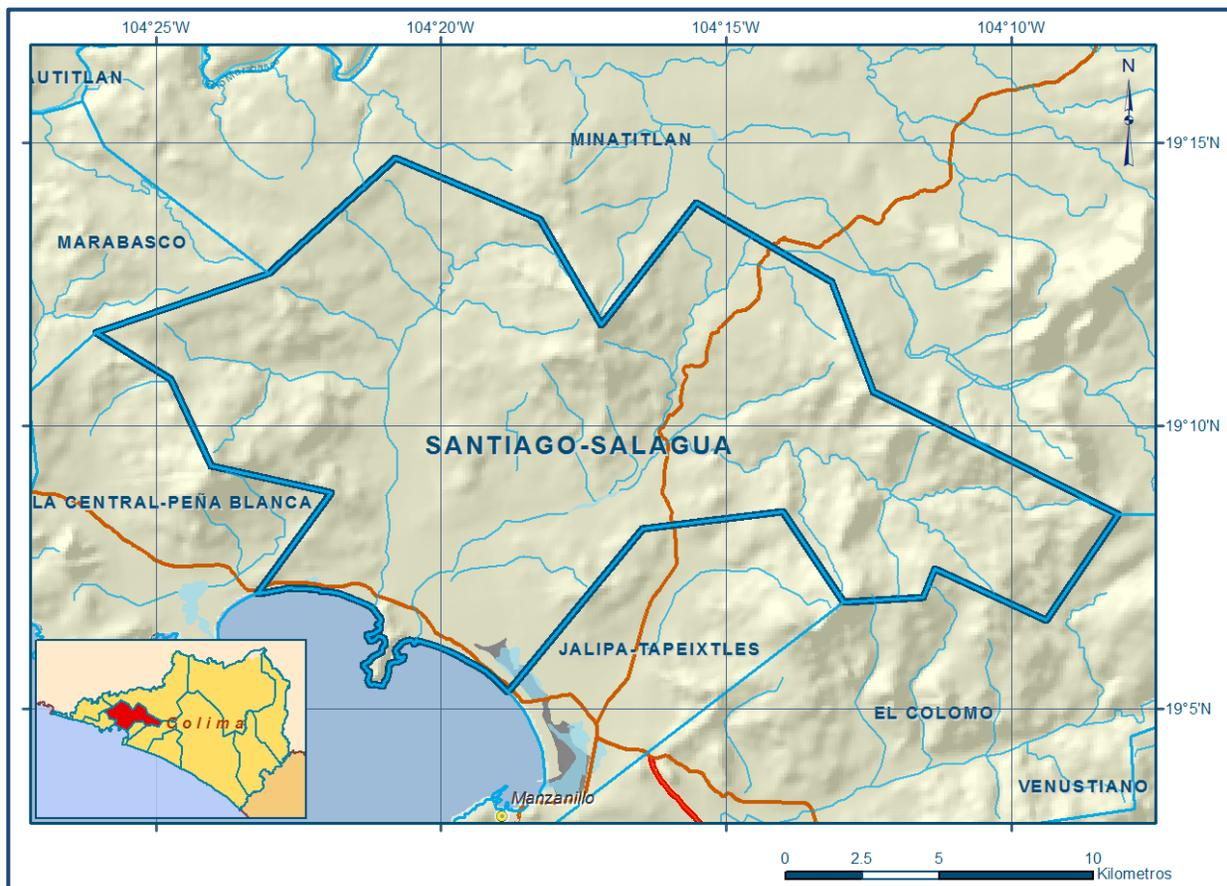


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0609 SANTIAGO-SALAGUA							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	23	13.0	19	7	2.5	
2	104	21	55.7	19	8	49.2	
3	104	24	2.5	19	9	17.2	
4	104	24	44.0	19	10	49.8	
5	104	26	3.5	19	11	39.3	
6	104	23	15	19	12	42.1	
7	104	20	48.2	19	14	43.6	
8	104	18	16.4	19	13	39.3	
9	104	17	12.1	19	11	46.8	
10	104	15	31.7	19	13	56.4	
11	104	13	9.0	19	12	33.0	
12	104	12	25.8	19	10	36.5	
13	104	8	7.9	19	8	26.1	
14	104	9	24.0	19	6	33.8	
15	104	11	20.8	19	7	28.4	
16	104	11	33.5	19	6	57.9	
17	104	12	56.7	19	6	53.2	
18	104	14	0.7	19	8	28.8	
19	104	16	28.7	19	8	10.5	
20	104	18	49.7	19	5	17.9	DEL 20 AL 1POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	104	23	13.0	19	7	2.5	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Santiago-Salagua pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Colima. Su territorio completo se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de la zona costera del Estado de Colima, controlándose las extracciones, uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo de dicha zona”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 20 de agosto de 1973.

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

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

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

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

### **ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES COSTEROS EN LOS ALREDEDORES DE MANZANILLO, COL., elaborado por HIDROTEC, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH), en 1974.**

Los objetivos del estudio fueron determinar el balance de agua subterránea en cinco valles que conforman la zona de estudio, determinar la posible existencia de intrusión marina; así como establecer las recomendaciones más convenientes para su explotación y para la vigilancia del avance de los frentes de intrusión.

Incluye los acuíferos Santiago-Salagua, Jalipa-Tapeixtles, El Colomo, Venustiano Carranza, Armería-Tecomán-Periquillos.

Se realizaron las siguientes actividades: censo, piezometría, nivelación piezométrica, hidrometría, fotogeología y recorridos de campo, pruebas de bombeo, sondeos eléctricos verticales, muestreo y análisis fisicoquímico.

Para el caso del acuífero Santiago-Salagua realiza censo e hidrometría de las extracciones, reporta la existencia de 70 aprovechamientos, 58 pozos con profundidades totales entre 47 y 85 m, y 12 norias que presentaban una profundidad de 8 a 10 m. La extracción era de 11.2 hm<sup>3</sup> anuales, mientras que la recarga estimada fue de 5.8 hm<sup>3</sup> anuales.

La calidad del agua se reporta dentro de los límites para su uso potable. Identifica una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur y noreste-suroeste, paralela al escurrimiento superficial.

**AMPLIACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES COSTEROS CERCANOS A MANZANILLO, EN EL ESTADO DE COLIMA, realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A., en 1975.** Los objetivos del estudio fueron

determinar las características geométricas de las cuencas tanto en el sentido vertical como horizontal; definir el funcionamiento hidráulico con base en las características piezométricas e hidrométricas; proponer alternativas de explotación de acuerdo a las necesidades y almacenamiento subterráneo, así como el establecimiento de un modelo inicial de funcionamiento con base en la calidad e información hidrogeológica recopilada. Incluye los Valles de Jalipa-Tapeixtles, Santiago-Salagua y Venustiano Carranza.

En el acuífero Santiago-Salagua, entre sus actividades principales destaca el censo de 77 aprovechamientos hidráulicos, de los cuales 62 son pozos y 15 norias, con un volumen medio anual de extracción de 12.1 hm<sup>3</sup>. La calidad de agua en el valle indicó que era apta para cualquier tipo de cultivo, sólo con salinidad alta en la zona aledaña a Salagua. Los valores de transmisibilidad varían entre 0.3 y 131.0 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s, en tanto que la conductividad hidráulica registró valores entre 0.03 y 2.0 x10<sup>-3</sup> m/s. Calcula un abatimiento promedio de 0.6 m anuales.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ÁREA BAJA DEL VALLE DE SANTIAGO-SALAGUA, COLIMA, elaborado por la compañía FRACCIONADORA Y HOTELERA DEL PACIFICO, S.A., en 1977.** Su objetivo principal fue determinar el caudal máximo de extracción aprovechable para proponer la perforación de pozos en la zona baja del valle de Santiago-Salagua. Entre sus actividades de campo destacan la piezometría, el censo de aprovechamientos, aforo del flujo base de los arroyos Chandiablo y Punta de Agua, nivelación diferencial de brocales, ejecución de 18 pruebas de bombeo para conocer los parámetros hidráulicos y toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos.

Con la información generada, determina la salinidad del agua subterránea y la posición de la interfase marina; concluye que los niveles han mantenido un almacenamiento subterráneo prácticamente constante.

**DETERMINAR EL POTENCIAL HIDRÁULICO DE LOS VALLES ALEDAÑOS A LA BAHÍA DE MANZANILLO Y DEFINIR LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE BUENA CALIDAD A FUTURO INMEDIATO, realizado por PROYESCO, S.A., para la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, en 1978.** El trabajo tiene como objetivo la evaluación del potencial hidráulico y definición de fuentes de abastecimiento de buena calidad para el desarrollo turístico y económico de los valles costeros La Central, Santiago-Salagua, Jalipa-Tapeixtles y El Colomo.

Incluye censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, análisis fisicoquímico de las muestras de agua subterránea, ejecución de 15 pruebas de bombeo y 15 sondeos eléctricos verticales.

Con esta información se definió la geometría de los acuíferos y de terminó su potencial. El análisis de evolución del nivel estático considera el periodo 1973-1978. Para el caso del valle Santiago-Salagua, en 1978 las profundidades de los niveles estáticos variaban de 5 a 50 m. Respecto a los espesores de unidades litológicas se reportaron variaciones entre 70 y 100 m, que corresponden a depósitos sedimentarios recientes.

Concluye que la intrusión marina no ha causado afectaciones y que el agua es apta para el consumo humano, menciona que de este valle se puede extraer un volumen adicional de 4.0 hm<sup>3</sup> anuales y recomienda para ello la perforación de 3 pozos que aporten un caudal de 40 lps cada uno.

**ACTUALIZACIÓN DE LAS CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS VALLES COSTEROS DEL ESTADO DE COLIMA, elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en 1987.** El objetivo principal de este estudio fue generar información hidrogeológica básica para ampliar el conocimiento del comportamiento hidráulico de los acuíferos, además de conocer la profundidad del nivel estático y el abatimiento generado debido a que las extracciones de agua subterránea superan su recarga natural. Incluye las configuraciones del nivel estático, considerando sus variaciones en las diferentes épocas del año, y una breve descripción de la calidad del agua subterránea.

**SINOPSIS GEOHIDROLÓGICA DEL ESTADO DE COLIMA, elaborada por Comisión Nacional del Agua en 1990.** Este documento considera, para el acuífero Santiago-Salagua, la descripción del marco físico, su población, extensión territorial, clima, fisiografía y geología. En el informe se tratan las componentes del ciclo hidrológico y se plantea el balance hidrometeorológico, asimismo, se describen los aspectos relativos a los acuíferos y se conjuga la información de aguas superficiales y subterráneas. Se concluye que en el acuífero Santiago-Salagua existe una sobreexplotación incipiente, recomienda reducir la extracción para disminuir la sobreexplotación y el riesgo de intrusión salina.

**ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS DE COLIMA, EL COLOMO, SANTIAGO-SALAGUA Y MARABASCO, EN EL ESTADO DE COLIMA. Realizado en 2007 por Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C.V. (SIIDSA) para la Comisión Nacional del Agua.**

Entre sus objetivos destacan: Establecer una red de monitoreo confiable para la obtención de información hidrogeológica y piezométrica de los acuíferos; actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea, determinar con precisión las elevaciones de los brocales o de los puntos de medición en cada uno de los vértices de la red de medición, recopilar, integrar y analizar la información piezométrica y de calidad del agua para elaborar los planos con las configuraciones respectivas y determinar el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero.

Concluye que la profundidad al nivel estático varía de 3 a 32 m, con elevaciones que se incrementan desde la zona costera, de 0.1 m a 40.5 msnm.

En cuanto a la salinidad, los análisis fisicoquímicos reportan concentraciones que varían de 132 a 870 ppm de sólidos totales disueltos, con pH entre 6.3 y 7.5.

**EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DE LA INTERFASE SALINA EN LA ZONA COSTERA DEL ACUÍFERO SANTIAGO SALAGUA, EN EL ESTADO DE COLIMA, elaborado por el Servicio Geológico Mexicano para Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Colima, en 2013.**

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, 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.

Adicionalmente, se llevaron a cabo sondeos eléctricos verticales, perfiles de conductividad eléctrica y muestreo de agua subterránea para análisis fisicoquímico, cuya información sirvió para caracterizar la posición actual y el avance de intrusión salina.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia fisiográfica**

De acuerdo a la clasificación de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero Santiago-Salagua se localiza dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, en el límite con el Eje Neovolcánico, en la Subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima, que se caracteriza por tener un relieve que incluye sierras, valles y llanuras costeras.

A su vez está formada por una serie de topoformas, entre las que destacan: i) Sierra, ii) Llanura con Lagunas Costeras, iii) Llanuras con Deltas, iv) Valle y v) Valle con Lomeríos. Gran parte de la extensión del acuífero está cubierto por sierras, cuyas elevaciones varían de 120 a 950 msnm y orientaciones preferentes norte-sur.

En la zona de valle se observan características fisiográficas asociadas al relleno de pequeñas fosas sepultadas, con elevaciones que varían de 20 msnm en la zona costera, hasta 80 msnm en los extremos norte y noreste del valle. La forma del valle está controlada principalmente por la distribución de las rocas graníticas.

#### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en la superficie que cubre el acuífero predomina el clima cálido subhúmedo  $Aw_0(w)$ , con lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 2 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: Punta de Agua y Chandiablo, la primera ubicada en la zona costera, mientras que la segunda en zona de sierra, al noreste del acuífero, cuyo registro comprende el periodo 1951-2010.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **858 mm/año** y **26.7°C** respectivamente. En términos generales el régimen pluvial se presenta de junio a octubre, cuando se registran los valores más altos de precipitación.

Existe un régimen de lluvias invernal que cubre de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas.

### **3.3 Hidrografía**

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en la Región Hidrológica RH 15 “Costa de Jalisco”, dentro de la cuenca Río Chacala-Purificación, subcuenca Laguna de Cuyutlán. La Región Hidrológica tiene una extensión territorial de 12,967 km<sup>2</sup>, limita al norte con la Región Hidrológica No.13, “Río Huicicila”, mientras que al oriente limita con las Regiones Hidrológicas No. 14, “Río Ameca” y No.16, “Armería-Coahuayana”.

Las corrientes superficiales del acuífero son los arroyos Chandiablo y Punta de Agua, los cuales nacen en la zona montañosa que delimita al acuífero, presentan drenaje principalmente de tipo subparalelo y rectangular, controlado por el marco litológico y estructural. En la zona costera se localiza una serie de cuerpos lagunares, entre los que destaca la Laguna Las Garzas, compartida con el Acuífero Jalipa-Tapeixtles, y otras de menores dimensiones ubicadas en las comunidades Santiago y Salagua.

### **3.4 Geomorfología**

La conformación del relieve es el resultado de la acción conjunta de los procesos endógenos y exógenos. Los primeros son de tipo magmático y tectónico y se manifiestan en los Cerros El Centinela, Naranja, Cimborro, La Ocotea y El Campanario. El relieve exógeno se presenta en las formas denudatorias de tipo fluvial, planicies aluviales y deltáicas, fluvio-denudatorias, eólicas y orgánicas. El área presenta dos periodos de erosión fluvial que corresponden al ciclo geomorfológico de las etapas juvenil y de madurez avanzada (Carta Geológico-Minera Manzanillo E13-B43. Escala 1:50,000. SGM, 1996).

Las condiciones morfológicas a nivel regional están expuestas en la Sierra Madre del Sur, la cual se extiende a lo largo de una franja de orientación general noroeste-sureste en forma paralela a las estructuras geológicas, principalmente fallas de tipo normal, asociadas a una serie de cañadas que evidencian un drenaje principal con orientación preferente noreste-suroeste, es decir, perpendicular al eje principal de la sierra. Los principales rasgos morfológicos de la zona son producto de diversos eventos geológicos, tal es el caso de las deformaciones que generó la Orogenia Laramide, causando también la elevación de grandes cuerpos graníticos, que bordean prácticamente toda la zona de valle del acuífero.

Geomorfológicamente se reconocen dos formas principales de terreno: planicie aluvial y unidad montañosa. La planicie aluvial presenta formas de relieve característico de valle, tal es el caso del valle del acuífero, además de los valles conocidos como Cihuatlán, La Central, Jalipa-Tapeixtles y El Colomo, constituidos por sedimentos clásticos cuaternarios, que presentan relieve plano e inclinado hacia la costa, con pendientes que no superan el 3%.

Para el caso del acuífero, la zona de valle tiene una forma geométrica de “U” ensanchada, que indica un ciclo geomorfológico de madurez avanzado. La unidad montañosa muestra fuertes pendientes con accidentes topográficos semiabruptos, principalmente en zonas cubiertas por rocas graníticas alteradas, que a su vez tienden a formar lomeríos con presencia de estructuras paralelas a los valles, constituyendo la fuente principal del material depositado en las planicies.

Destaca la presencia de una serie de estructuras geológicas regionales, principalmente fallas normales con orientación preferente noreste-suroeste, así como norte-sur, generadas por un periodo distensivo en el Terciario, dando origen una serie de fosas tectónicas como la que se encuentra en la zona de valle del acuífero, rellena por depósitos sedimentarios recientes.

Por otra parte, el dominio de planicies costeras y rellenos sedimentarios de pendientes suaves, indica procesos avanzados de intemperismo, erosión y depósito.

#### **4. GEOLOGÍA**

A nivel regional, en el área de estudio afloran elementos del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983), cuya la base de la columna geológica corresponde a rocas metamórficas de probable edad Paleozoico Superior y cuarcitas y metasedimentos de edad Jurásico Superior. Se presentan afloramientos de andesitas de textura afanítica, tobas y brechas que corresponden al macizo volcánico del arco de Zihuatanejo, de edad Aptiano-Albiano, así como una unidad constituida por brechas andesíticas, de edad Aptiano, conocida como Brecha Jalisco. Sobre las unidades anteriores se encuentran varios conjuntos litológicos, como la Formación Tepalcatepec, constituida por una secuencia vulcanosedimentaria de edad Aptiano-Cenomaniano, así como la Formación Madrid, conformada por calizas y lutitas de edad Aptiano Superior–Albiano (figura 2).

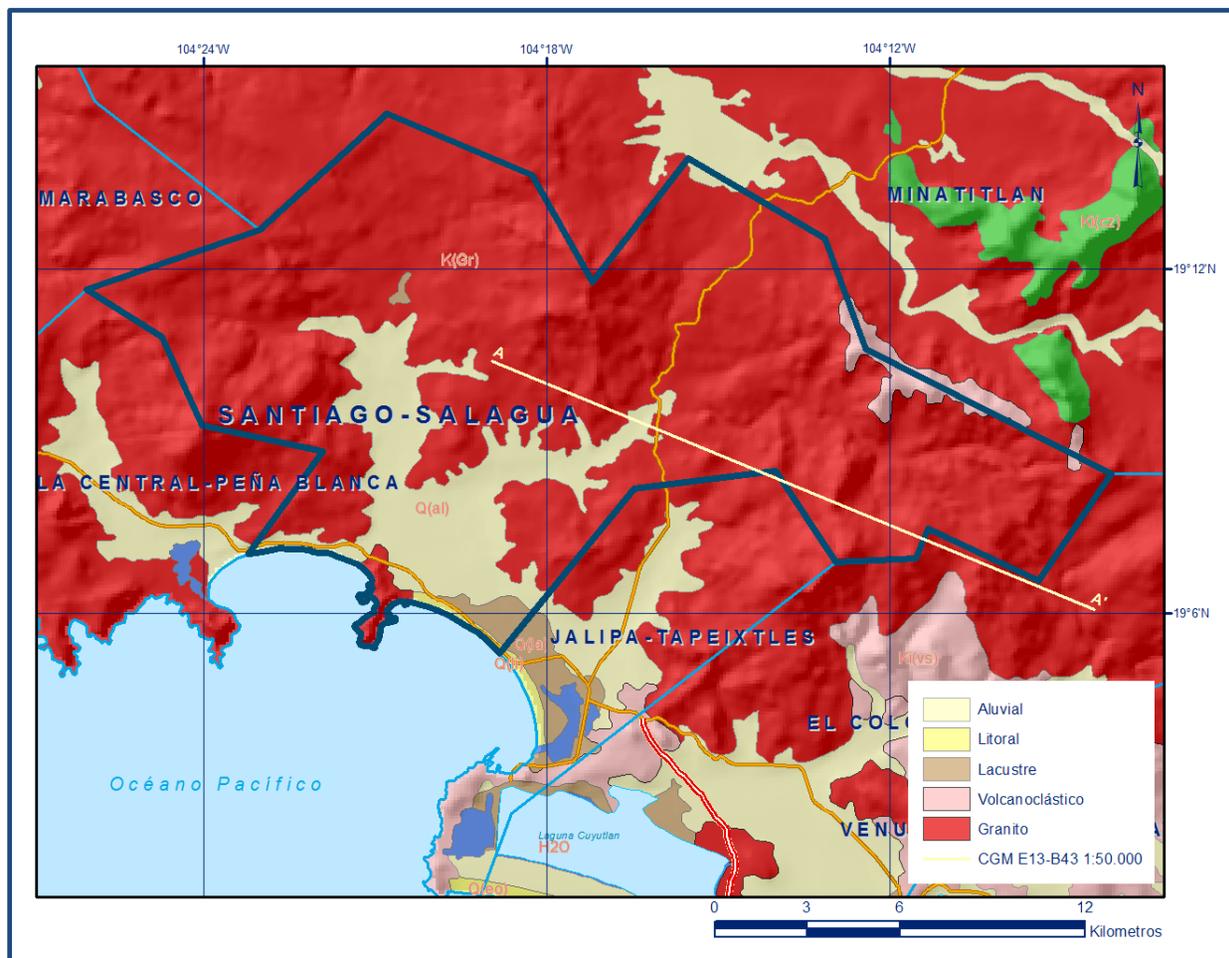


Figura 2. Geología general del acuífero

Cubriendo indistintamente a estas unidades existe un paquete constituido por yesos en la base y calizas de plataforma hacia la cima, de edad Albiano-Cenomaniano. De igual manera, se considera a la Formación Cerro de La Vieja como una cubierta de arco constituida por un conglomerado de calizas y andesitas, cuya edad se asigna al Turoniano-Coniaciano en concordancia estructural con las rocas subyacentes.

Las secuencias volcánicas de la Sierra Madre Occidental están representadas por andesitas y tobas andesíticas de edad Eoceno, así como por tobas riolíticas, domos riolíticos, tobas riolíticas y riolitas de edad Oligoceno-Mioceno.

Representando el Cinturón Volcánico Transmexicano se tienen basaltos de edad Plioceno.

Las unidades más recientes están constituidas por un conglomerado polimíctico y areniscas del Pleistoceno, así como por aluvión, suelos residuales, palustres, lacustres y arenas finas de playa del Holoceno (Carta Geológico-Minera Manzanillo E-13-2-5. Escala 1:250000. SGM, 2000).

#### **4.1 Estratigrafía**

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende rocas metamórficas, sedimentarias, volcánicas, vulcanosedimentarias e intrusivas, cuyas edades varían del Paleozoico Superior al Reciente. A continuación, se describen las unidades geológicas de la más antigua a la más reciente, cuya distribución geográfica se observa en la figura 2.

#### **PALEOZOICO SUPERIOR**

¿Constituye el basamento de la región y está representado por rocas metamórficas como gneises de biotita y muscovita asociados a migmatitas, esquistos de muscovita y anfibolitas de hornblenda, consideradas tentativamente de edad Paleozoico Superior? (Ordoñez, 1904 y López Ramos, 1979).

Los afloramientos de estas rocas son aislados y en forma de ventanas, la mayoría de ellos localizados en las inmediaciones de las poblaciones Agua Blanca, Las Antiguas Juntas, Veladero de Camotlán y al norte de Camotlán,

#### **JURÁSICO**

##### **Cuarcita Tamazula**

Se trata de una unidad clasificada como cuarcita micácea, producto de metamorfismo regional, la cual tiene un aspecto gris con tonos oscuros, textura compacta de tipo granoblástica, de aspecto sacaroide, con granulometría variada. Sus afloramientos se restringen exclusivamente a la porción este y sureste del acuífero, específicamente al norte de la comunidad Las Nuevas Juntas, cubriendo principalmente las partes topográficamente más altas.

#### **CRETÁCICO INFERIOR**

##### **Formación Tecalitlán**

Secuencia constituida por derrames porfídicos de composición riolítica a dacítica, con intercalaciones de tobas, de estructura compacta y color rojizo a café pardo; incluye una sucesión piroclástica (brechas, aglomerados e ignimbritas), cuya composición principal varía de andesitas a riolitas.

Su espesor es variable, los reportes de PEMEX indican 177, 420 y 2,300 m, en los pozos Colima-1, Jalisco-1 y Tonaya-1, respectivamente. Aflora en las porciones este y sureste del acuífero, en los alrededores de la localidad Veladero de Camotlán.

### **Formación Morelos**

Con este nombre Fries (1960) define una secuencia de calizas y dolomías de edad Albiano-Cenomaniano, que aflora principalmente en los estados de Morelos, Guerrero y México, de color gris cremoso a negro, de textura que cambia de calcilutita a calcarenita, con presencia de nódulos de pedernal muy esporádicos y horizontes de caliza dolomítica.

Está constituida por una caliza que varía en color de gris claro a negro, con una textura de calcilutita a calcarenita, de espesor mediano a grueso. Sus afloramientos se encuentran en los extremos noreste y sureste del acuífero, cerca de la localidad de Veladero de Camotlán, y han sido correlacionados con esta formación (PEMEX, 1980), constituyendo un casquete aislado en forma de ventana tectónica ubicada en dirección este y noreste del Cerro Prieto. Pantoja y Fries 1959, por la presencia de *Toucacia* y *Actoeonella*, le estiman una edad Albiano Superior-Cenomaniano Inferior.

Entre los estratos gruesos y masivos suelen presentarse horizontes de yesos, tal es el caso de los afloramientos ubicados en los alrededores de la comunidad Soyatlán.

Presenta cambios de facie que muestran una caliza arcillosa, de aspecto terroso al intemperismo, con fauna principalmente de moluscos, interestratificada con lutitas carbonosas de estratos delgados.

Su espesor se considera que varía entre los 300 y 500 m, sin descartar que sea mayor. Como cubierta del macizo rocoso del arco de Zihuatanejo se presentan las siguientes tres unidades:

### **Formación Tepalcatepec**

Unidad constituida por una secuencia vulcanosedimentaria de areniscas, tobas andesíticas, conglomerados, lutitas y lodolitas calcáreas y lentes de caliza, cuya edad determinada por su contenido fosilífero es Aptiano-Cenomaniano.

### **Formación Madrid**

Se considera un cambio de facies lateral de la formación anterior, está constituida por calizas y lutitas de edad Aptiano Superior-Albiano. Cubriendo indistintamente a estas

unidades, se tiene un paquete constituido por yesos en la base y calizas de plataforma hacia la cima, de edad Albiano-Cenomaniano.

### **Formación Cerro de La Vieja**

Constituida por un conglomerado de fragmentos subangulosos a semi-redondeados de calizas y andesitas, en una matriz areno-arcillosa, cuya edad asignada corresponde al Turoniano-Coniaciano, debido a que localmente se observa en concordancia estructural con las rocas subyacentes.

## **CRETÁCICO SUPERIOR**

### **Rocas vulcanoclásticas**

Están constituidas por tobas andesíticas a intermedias, intercaladas con ignimbritas, brechas ácidas, derrames andesíticos, dacíticos y latíticos, que se caracterizan por presentar gradación, estructura lenticular y capas bien definidas con espesor de 0.1 a 0.6 m. Fueron depositadas en un medio ambiente somero, atribuido al desarrollo de un arco volcánico insular a partir del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, cuya declinación ocurrió en el Cretácico Superior (Ferrusquía 1978; Campa 1979). Sobreyacen discordantemente a depósitos calcáreos marinos de la Formación Morelos.

### **Batolito de Manzanillo**

Cuerpo intrusivo de dimensiones batolíticas, de composición granodiorítica, cuya edad se asigna al Cretácico Superior (Grajales, et al., 1993), el cual durante un evento posterior fue intrusionado por un cuerpo granítico de la misma edad que afectó a las rocas metamórficas del Paleozoico Superior y a unidades del Cretácico.

Contemporáneamente y como un segundo evento del Cretácico Superior, surgió un cuerpo intrusivo de composición tonalítica que intrusionó a las rocas metamórficas, cretácicas y a la misma masa granodiorítica. A partir de los análisis de los elementos traza, es posible establecer que este batolito tiene una afinidad tectónica correspondiente a los granitos desarrollados en un arco volcánico, de tal manera que representa las raíces de un arco volcánico Cretácico.

Aflora en gran parte del acuífero, principalmente bordeando pequeñas zonas de valle, así como parte de la planicie costera, cubierto por las rocas andesíticas de edad Cretácico. Por su estructura compacta constituye barreras naturales y basamento hidrogeológico del acuífero.

## **TERCIARIO**

### **Rocas volcánicas**

Están representadas por tobas y brechas intermedias, tobas andesíticas, tobas y brechas ácidas, andesitas y latitas, que fueron emitidas durante una primera fase de vulcanismo terciario. Megascópicamente presentan textura afanítica a porfirítica, color gris claro a violáceo y una estructura semicompacta a masiva en pseudoestratos. Sobreyacen en discordancia a rocas vulcanoclásticas del Cretácico Superior. Por su posición estratigráfica se le considera de edad Paleógeno y afloran en el extremo sureste del acuífero.

### **Rocas intrusivas**

Representadas por rocas de composición monzonítica y diorítica, originadas durante el evento magmático del Paleógeno; afloran en forma de troncos y diques que intrusionan a rocas metamórficas, a la secuencia cretácica y a las rocas volcánicas del Paleógeno hasta la traquita. Durante el mismo evento la monzonita intrusionó a la masa granítica, y la diorita a la granodiorita, granito y tonalita.

## **CUATERNARIO**

### **Conglomerados**

Están representados por un conglomerado oligomíctico constituido por fragmentos subredondeados de roca homogénea de 1 a 5 cm de diámetro; y un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados y mal clasificados de rocas sedimentarias calcáreas, metamórficas, volcánicas e intrusivas, semiconsolidados, de textura clástica en fragmentos de 5 a 20 mm de diámetro. Ambos son de edad Pleistoceno.

### **Depósitos aluviales recientes**

Constituidos por materiales no consolidados derivados del intemperismo y erosión de las rocas que afloran en el área, rellenan los valles de Santiago y Salagua y su granulometría varía de fina a gruesa, con algunos lentes arcillosos irregulares que le confieren semiconfinamiento local al acuífero. En ocasiones contiene depósitos evaporíticos que incrementan la salinidad del agua en forma local, fenómeno que no tiene relación alguna con la intrusión marina. En esta misma unidad se incluyen a los depósitos de gravas, arenas, limos, arcillas y material orgánico sin consolidar y de diferente granulometría, que forman los suelos residuales, palustres, lacustres, eólicos y litorales.

## **4.2 Geología estructural**

En la zona que cubre el acuífero y sus alrededores se ha identificado la presencia de al menos tres etapas de intrusión; la primera corresponde al emplazamiento de rocas granítico-granodioríticas con diferenciación hasta tonalitas, que conforman el Batolito de Manzanillo, con edades isotópicas entre 73 a 93 m.a. para los granitos y de aproximadamente 93 m.a. para las tonalitas, que las ubica en el Cretácico Superior, afectando a las unidades volcánicas y vulcanosedimentarias que conforman el Arco Zihuatanejo. Una segunda intrusión diorítica-tonalítica con edades entre 54 a 66 m.a. Se ubica en el Paleoceno, mientras que el último evento es de composición monzonítica, de posible edad Oligoceno.

La deformación frágil está representada por un sistema de fallas laterales sinclinales y dextrales, la mayoría de las cuales han sido reactivadas como normales conservando aún una componente lateral, ocasionalmente forman pilares y fosas como los grabens Autlán-El Grullo y Minatitlán.

Este sistema presenta dos direcciones, la principal NE-SE y la secundaria NE-SW, en menor frecuencia también se observan estructuras menores con orientación E-W y N-S que afectan indistintamente a rocas intrusivas y a rocas vulcanosedimentarias. La deformación compresiva está representada por pliegues anticlinales y sinclinales que se observan sólo en las rocas vulcanosedimentarias de la cubierta cretácica (anticlinales Amacuatitlán y Toxin); en las rocas del macizo volcánico no es muy clara esta deformación (Carta Geológico-Minera Manzanillo E-13-2-5. Escala 1:250000. SGM, 2000).

La región donde se localiza el acuífero tiene complejidad geológica debido a la presencia de varios eventos geológico-estructurales relacionados principalmente por la subducción de las placas Cocos y Rivera, así como por la cercanía con los límites de diferentes bloques estructurales.

Se reconocen en la región por lo menos dos eventos tectónicos compresivos, uno ocurrido durante el Jurásico Superior, al cual se suma otro en el período Cretácico Superior-Paleógeno, conocido como Orogenia Laramide. Estos eventos deformacionales tienen estrecha relación con el emplazamiento de cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas.

En el acuífero afloran rocas de edad cretácica que fueron afectadas por la Orogenia Laramide, originando fallas, pliegues y cabalgaduras, estas últimas no se observan dentro de los límites del acuífero. Los pliegues se presentan principalmente en unidades sedimentarias como las formaciones Madrid y Cerro de La Vieja, pero no en la Formación Tepalcatepec. Los pliegues y fallamientos regionales tienen orientación general noroeste-sureste y las fallas de rumbo nor-noreste y sur-suroeste.

Posterior al evento laramídico se reconoce una tercera fase de deformación de carácter distensivo, que se manifiesta hacia el Neógeno con el desarrollo de fallas normales, fosas tectónicas y vulcanismo asociado. De este periodo destacan en el área de estudio la presencia de fallas normales de orientación general norte-sur que delimitan una fosa tectónica.

A nivel regional los lineamientos son claramente visibles en las imágenes de satélite desde los flancos este y oeste del Volcán de Colima y extendiéndose en dirección sur hasta la costa. Se reconocen otras fallas asociadas de menores dimensiones que intersectan a las estructuras más antiguas.

### **4.3 Geología del Subsuelo**

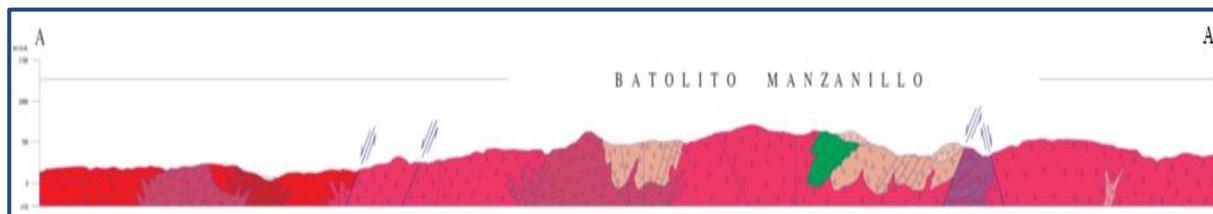
De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación hidrogeológica con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por materiales clásticos aluviales y fluviales de granulometría variada y conglomerados, acumulados en los cauces de ríos, arroyos y en la planicie costera, cuyo espesor varía de 10 a 90 m y se incrementa de las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, hacia la planicie costera y hacia las fosas tectónicas.

Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer parte de las necesidades de agua subterránea en la zona.

Los depósitos granulares fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas constituidas durante la Orogenia Laramide.

La porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la

alteración; así como por las rocas intrusivas (figura 3). El espesor del medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.



Fuente: Carta Geológica-Minera H13-B43 "Manzanillo". Escala 1:50,000. SGM, 1996

Figura 3. Sección geológica esquemática

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

Con base en los estudios hidrogeológicos realizados, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, es posible establecer que el acuífero es de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos lacustres en las zonas cercanas a las lagunas.

Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar más de cien metros en la porción centro sur del acuífero; en su porción inferior por rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanosedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

### 5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2013, se ejecutaron dos pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, de los estudios llevados a cabo en 1977 y 1978, se cuenta con información de 33 pruebas de bombeo más realizadas en el acuífero y sus alrededores.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se observa que los valores de transmisividad varían **de  $4.7 \times 10^{-3}$  a  $16.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (410 a 1,400  $\text{m}^2/\text{d}$ )**, con un valor promedio de  **$9.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (800  $\text{m}^2/\text{d}$ )**, mientras que la conductividad hidráulica registra valores que varían de  **$4.8 \times 10^{-4}$  y  $1.1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  (41 a 950  $\text{m/d}$ )**, con un valor promedio de  **$2.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (207  $\text{m/d}$ )**.

Los valores más altos se registran en la porción alta de la planicie costera y en las inmediaciones de los cauces principales, donde predominan los clásicos gruesos de alta permeabilidad; en tanto que los valores mínimos se asocian a lentes arcillosos.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, de acuerdo a la constitución geológica del acuífero, es posible establecer que el rendimiento específico varía de 0.1 a 0.25.

### **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se eligió la información piezométrica de los años 2007 y 2013.

### **5.4 Comportamiento Hidráulico**

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

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2013 muestra que los valores varían de 2 a 34 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia los flancos de las sierras que limitan la planicie costera.

Los niveles estáticos más someros, de 1 a 8 m, se registran en aprovechamientos más cercanos a la costa, particularmente en la zona donde se ubican las comunidades Santiago y Salagua, desde donde se incrementan gradualmente hacia el norte y noreste del acuífero, hasta 34 m en la comunidad El Pochote (figura 4).

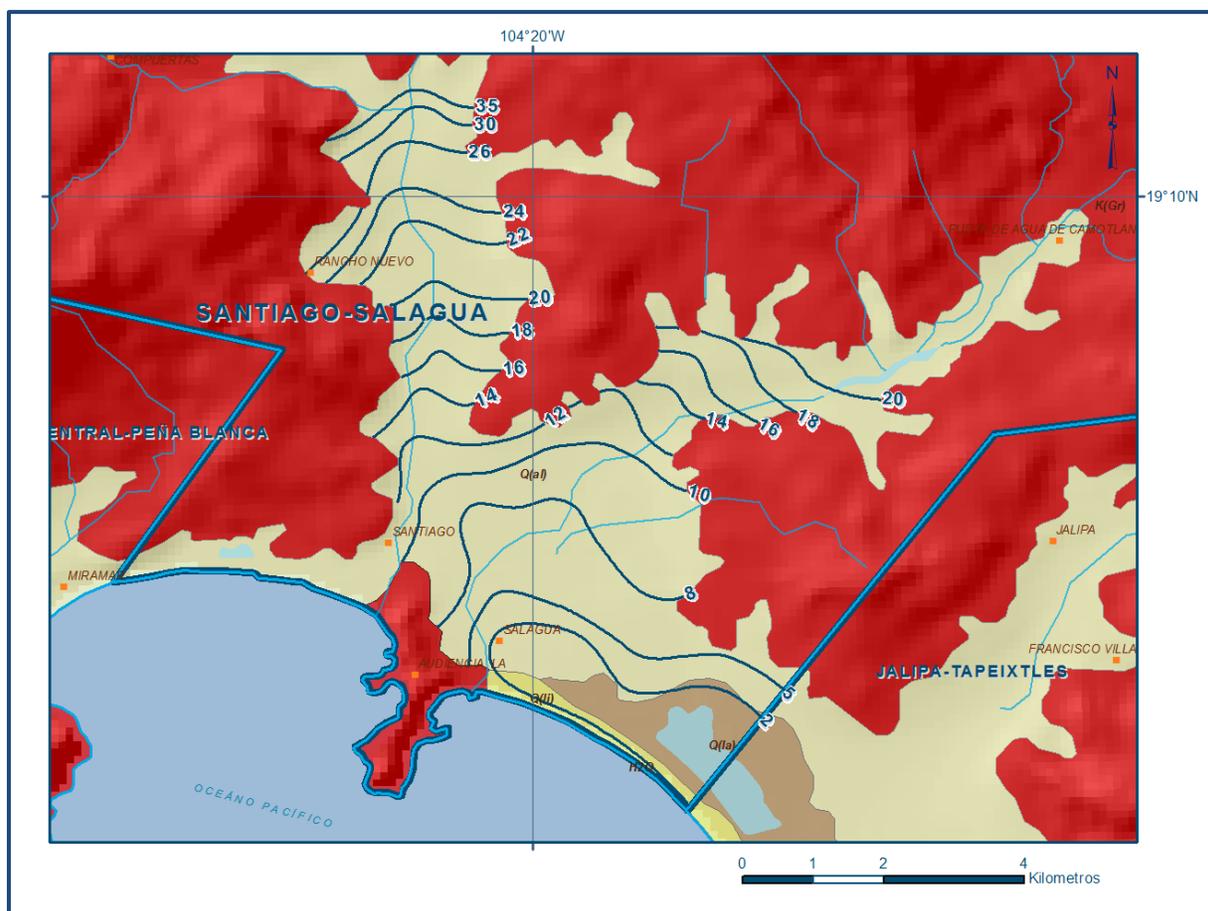


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo a la configuración de nivel estático para 2013, se observa que los valores varían de 1 a 42 msnm. Las menores elevaciones, entre 1 y 8 msnm, se registran en la región suroeste del acuífero, en las cercanías de la laguna Las Garzas, así como en las comunidades Santiago y Salagua, que representan las salidas naturales del acuífero, aumentado gradualmente, al igual que la profundidad, por efecto topográfico, hacia el noreste, hasta 18 msnm al oriente de la comunidad Las Humedades, y al norte hasta 42 msnm, que se registran al poniente de la comunidad El Pochote (figura 5).

De esta manera se define la trayectoria preferencial del flujo subterráneo NE-SW y N-S, paralela a la dirección de escurrimiento superficial. Como resultado de dejar de operar los pozos que abastecían de agua potable a Manzanillo, se recuperaron los niveles del agua subterránea y desaparecieron los conos de abatimiento.

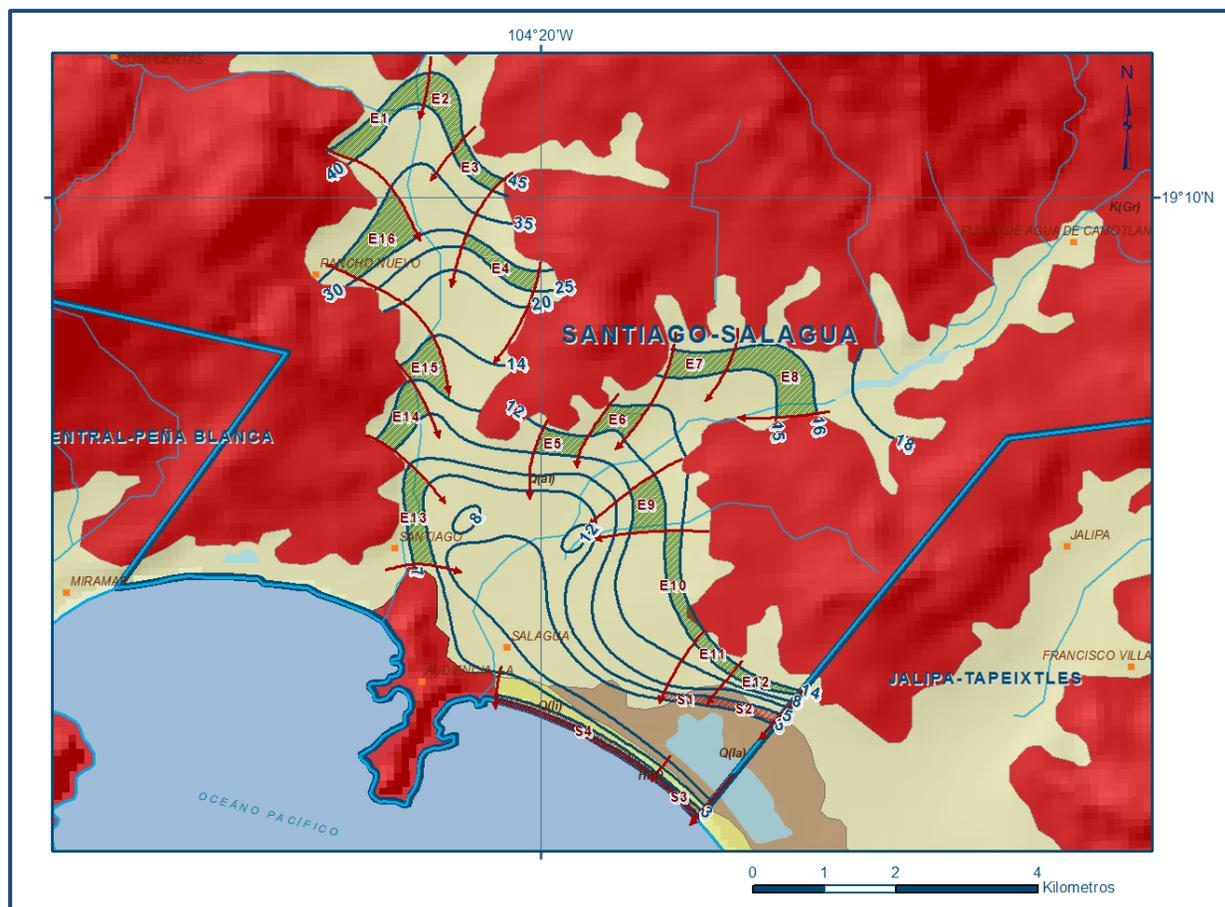


Figura 5. Elevación al nivel estático en msnm (2013)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2007-2013, se observa una recuperación generalizada de los niveles del agua subterránea como resultado de haber dejado de extraer agua de los pozos que abastecían a la ciudad de Manzanillo, aunado a que la campaña piezométrica del año 2013 se llevó a cabo durante el periodo de lluvias. Las recuperaciones varían de un metro en la zona costera, en los alrededores de las comunidades Santiago y Salagua, mientras que, al norte, en la zona donde confluyen los dos pequeños valles del acuífero, así como en sus extremos noreste y norte, la recuperación es de 2 m.

La mayor recuperación se observa en la porción media de los valles, con ascensos de 4 m, que representa un ritmo promedio anual de 0.15 m (figura 6).

En general, para la mayor parte de la superficie del acuífero, los niveles del agua subterránea no han sufrido variaciones significativas.

Se presentan abatimientos durante la época de estiaje que se recuperan de manera rápida en la temporada de lluvias.

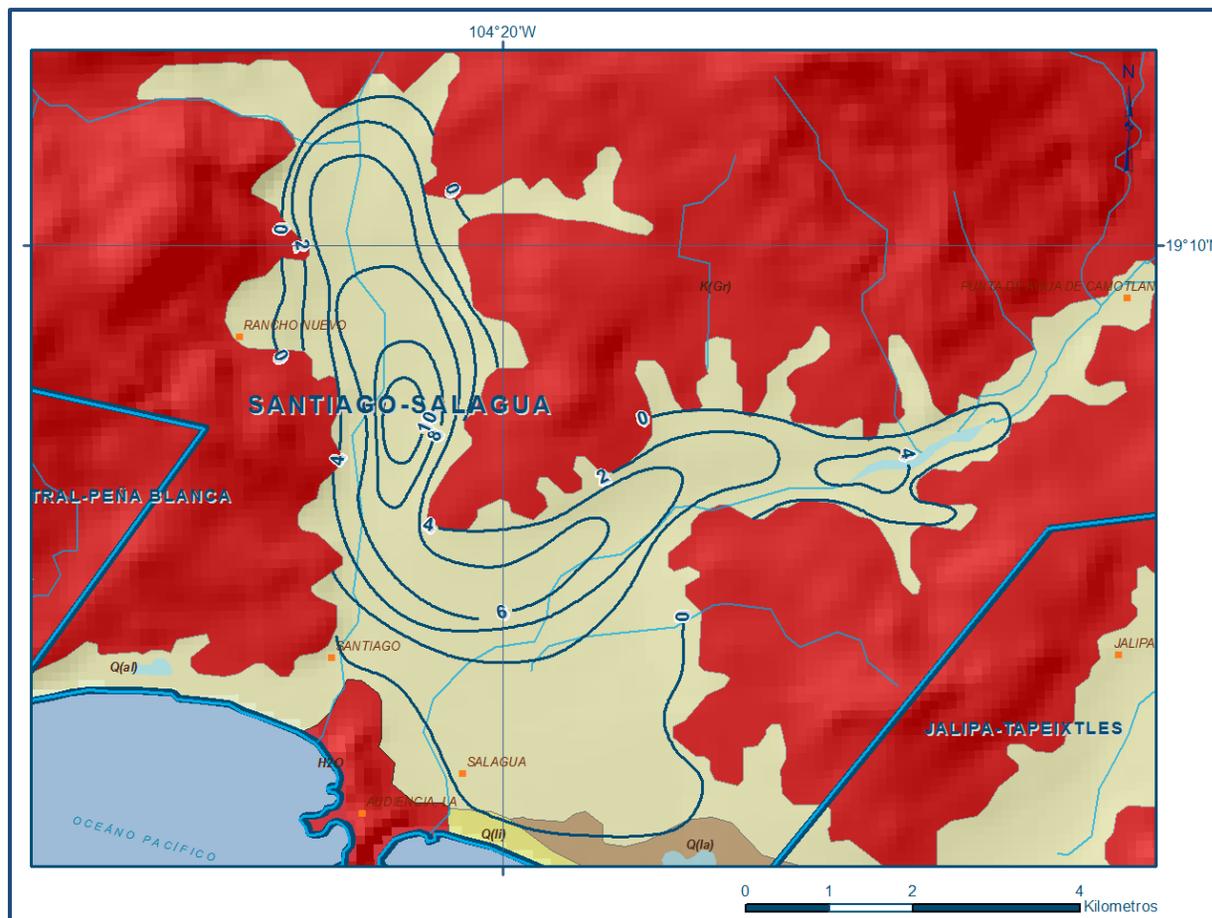


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1987-2013)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del Agua Subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2013, se tomaron 5 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (4 pozos y 1 noria) para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, así como iones principales, metales y metaloides.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, ninguno de los aprovechamientos sobrepasa el límite de sólidos totales disueltos que es de 1000 mg/l, establecido por la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022

Los valores de concentración de STD varían de 210 a 618 mg/l. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 452 a 1272  $\mu$ S/cm. Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona costera; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción norte y noreste del acuífero. Ambos valores se incrementan gradualmente desde la porción nororiental y norte del acuífero hacia la zona costera, en la dirección del escurrimiento superficial.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se observa la presencia de familias de agua de tipo bicarbonatada-cálcica-magnésica, asociada a agua de reciente infiltración, así como bicarbonatada magnésica, la cual representa un tiempo mayor de residencia en el acuífero, además de familias con componentes sulfatadas (sulfatada-magnésica), asociadas a agua que circula por depósitos evaporíticos relacionados con la presencia de paleo-lagunas.

En lo que se refiere a la presencia de grasas y aceites, todas las muestras presentaron concentraciones menores a 5 mg/l, valores inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Los coliformes fecales se presentan en concentraciones menores a 3 y hasta 4,600 NMP/100 ml, mientras que los coliformes totales varían desde menos de 3 hasta 11,000 NMP/100 ml.

De los aprovechamientos muestreados sólo dos extraen agua para consumo humano, los cuales presentan valores menores a 3 NMP/100 ml de coliformes fecales y totales, por lo que no representan problemas para la salud.

De los resultados obtenidos para aniones y cationes, con base en los elementos que contempla la NOM-127-SSA1-2021, las concentraciones que superan los límites máximos permitidos (LMP) son las siguientes: fierro con 4.11 mg/l y el LMP es de 0.3

mg/l, manganeso con 1.02 mg/l y el LMP es de 0.15 mg/l, así como nitratos (como N) con 13.02 mg/l y el LMP es de 10 mg/l.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), dos muestras se clasifican como C2-S1, que representa agua con salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, y tres como C3-S1, que representa salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el 2013, se registró la existencia de 56 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 52 son pozos y 4 norias, 45 se consideran activas y 11 inactivas. De las obras activas, 20 son para uso agrícola, 17 para uso público-urbano (todos son pozos), 6 para servicios y 2 de uso doméstico. El volumen de extracción calculado es de **14.9 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 9.4 hm<sup>3</sup> (63.1%) se utilizan para abastecimiento de agua potable, 4.7 hm<sup>3</sup> (31.5%) hm<sup>3</sup> para uso agrícola y 0.8 hm<sup>3</sup> (5.4%) para servicios. Para uso pecuario el volumen es muy pequeño.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 1987-2013, en una superficie de **50 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 subterráneos. La diferencia que existe entre la sumatoria de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

## 7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero ( $R_t$ ) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los ríos y arroyos, que en conjunto se consideran como recarga vertical ( $R_v$ ), y por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ ). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero ( $R_i$ ). Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para riego agrícola son incipientes y dado que los aprovechamientos de uso público-urbano no abastecen a poblaciones urbanas importantes, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga inducida, por lo que  $R_i = 0$ .

### 7.1.1 Recarga vertical ( $R_v$ )

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

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

Donde:

**Eh:** Entradas subterráneas por flujo horizontal

**Rv:** Recarga vertical por lluvia

**B:** Bombeo

**Sh:** Salidas subterráneas por flujo horizontal

**ETR:** Evapotranspiración real

**$\Delta V(S)$ :** Cambio de volumen de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ )

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte

de ellas y a través del piedemonte, 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * I$$

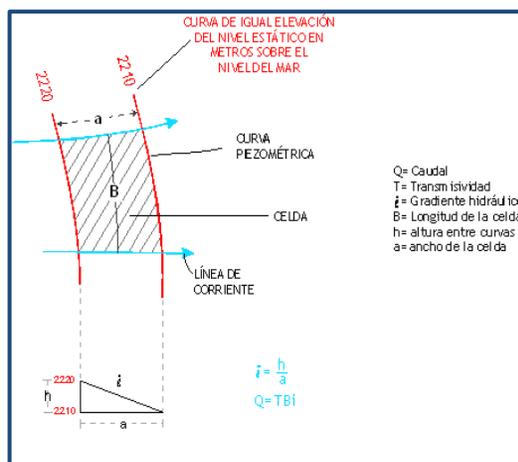
Donde:

**Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

**T** = Transmisividad (m<sup>2</sup>/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 celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **16.3 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T ( $m^2/s$ )	CAUDAL Q ( $m^3/s$ )	VOLUMEN ( $hm^3/año$ )
E1	1575	310	5	0.01613	0.0030	0.0762	2.4
E2	790	365	5	0.01370	0.0030	0.0325	1.0
E3	845	225	5	0.02222	0.0030	0.0563	1.8
E4	1070	310	5	0.01613	0.0030	0.0518	1.6
E5	565	450	4	0.00889	0.0030	0.0151	0.5
E6	675	340	2	0.00588	0.0030	0.0119	0.4
E7	1125	420	1	0.00238	0.0030	0.0080	0.3
E8	1295	565	2	0.00354	0.0030	0.0138	0.4
E9	620	310	4	0.01290	0.0030	0.0240	0.8
E10	1775	280	2	0.00714	0.0010	0.0127	0.4
E11	620	200	2	0.01000	0.0020	0.0124	0.4
E12	1015	140	2	0.01429	0.0020	0.0290	0.9
E13	1295	225	2	0.00889	0.0090	0.1036	3.3
E14	900	395	4	0.01013	0.0020	0.0182	0.6
E15	565	450	2	0.00444	0.0030	0.0075	0.2
E16	1635	365	5	0.01370	0.0020	0.0448	1.4
<b>Total entradas</b>							<b>16.3</b>

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas fueron obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos tanto en el acuífero como en otros vecinos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

## 7.2 Salidas

Las salidas del acuífero ocurren a través del bombeo (B), evapotranspiración (ETR) y salidas subterráneas horizontales (Sh). No existen descargas naturales por flujo base (Dfb), ni salidas por manantiales (Dm).

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **14.9  $hm^3$  anuales**.

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

Las descargas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4.

El valor calculado es de **4.5  $hm^3$  anuales**, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal.

CANAL	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	565	140	2	0.01429	0.0015	0.0121	0.4
S2	1125	195	2	0.01026	0.0015	0.0173	0.5
S3	1015	200	2	0.01000	0.0030	0.0305	1.0
S4	2310	170	2	0.01176	0.0030	0.0815	2.6
<b>Total entradas</b>							<b>4.5</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, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = **26.7 °C** y precipitación= **858 mm**. La lámina de ETR que se obtiene es de **818.1 mm**.

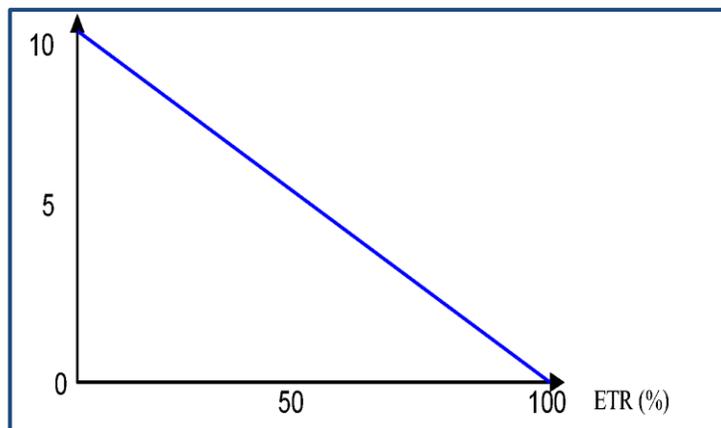
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	26.7		
P(mm) =	858	p <sup>2</sup> =	736164
L =	1919.20815	L <sup>2</sup> =	3683359.923
ETR (mm)	818.1		

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 10 m, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 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 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. La suma total se muestra en la tabla 4, en la que se observa que el volumen de la **ETR = 3.1 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración real

Intervalo entre curvas (m)	Profundidad media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	%	Lámina de ETR (m)	Volumen de ETR (hm <sup>3</sup> /año)
Menor de 5	3.0	3.5	0.7	0.8181	2.0
5 a 10	7.5	5.4	0.25	0.8181	1.1
				<b>TOTAL</b>	<b>3.1</b>

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2007-2013 (figura 5). Con base en ella y considerando un coeficiente de almacenamiento  $S_y$  de 0.15 (CONAGUA, 2006), se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 50.0 km<sup>2</sup>, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- Δ VS:** Cambio de almacenamiento en el período analizado;
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;
- A:** Área ente curvas de evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>);
- h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2007-2013 se puede observar en la tabla 5. El volumen promedio anual del cambio de almacenamiento asciende a **2.1 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 5. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2007-2013)

Evolución (m)	Recuperación promedio (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	ΔV(S) (hm <sup>3</sup> /año)
10	10.0	0.4	0.15	0.6
8 a 10	9.0	0.8	0.15	1.1
6 a 8	7.0	3.4	0.15	3.6
4 a 6	5.0	4.9	0.15	3.7
4	4.0	0.4	0.15	0.2
2 a 4	3.0	4.6	0.15	2.1
0 a 2	1.0	11.3	0.15	1.7
0	0.0	24.2	0.15	0.0
		<b>50.0</b>	<b>TOTAL</b>	<b>12.9</b>

### Solución de 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:

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 14.9 + 4.5 + 3.1 - 16.3 + 2.1$$

$$R_v = 8.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual está definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas:

$$R = R_v + Eh$$

$$R = 8.3 + 16.3$$

$$R = 24.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso su valor es **24.6 hm<sup>3</sup>/año**.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se calcula sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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/o prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Santiago-Salagua, su valor es de 6.1 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 4.5 hm<sup>3</sup> corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y 1.6 hm<sup>3</sup> al 50% de la evapotranspiración real que se

debe comprometer para preservar el ecosistema costero. Por lo tanto, **DNC = 6.1 hm<sup>3</sup> anuales.**

### **8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas**

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 **21,618,330 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

### **8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 24.6 - 6.1 - 21.618330 \\ \text{DMA} &= -3.118330 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **3,118,330 m<sup>3</sup> anuales.**

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1990. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Colima.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Actualización de mediciones piezométricas en los acuíferos de Colima, El Colomo, Santiago-Salagua y Marabasco, en el Estado de Colima. Realizado por Sanx, Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C.V. (SIIDSA).

Comisión Nacional del Agua, 2013. Exploración Hidrogeológica para Determinar la Posición de la Interfase Salina en la Zona Costera del Acuífero Jalipa-Tapeixtles, en el Estado de Colima. Realizado por el Servicio Geológico Mexicano.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1974. Estudio geohidrológico de los valles costeros en los alrededores de Manzanillo, Colima. Realizado por HIDROTEC, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1975. Ampliación del estudio geohidrológico de los valles costeros cercanos a Manzanillo, en el Estado de Colima. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1987. Actualización de las condiciones piezométricas de los valles costeros de Colima.