



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO ISLA DE COZUMEL (2305), ESTADO DE  
QUINTANA ROO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
	<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
1.1	Localización .....	2
1.2	Situación Administrativa .....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1	Provincia fisiográfica.....	5
3.2	Clima .....	6
3.3	Hidrografía.....	6
3.4	Geomorfología.....	7
<b>4.</b>	<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1</b>	<b>Estratigrafía .....</b>	<b>9</b>
4.2	Geología del subsuelo y estructural.....	12
<b>5.</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
5.1	Tipo de acuífero.....	14
5.2	Parámetros hidráulicos.....	15
5.3	Piezometría.....	15
5.4	Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	17
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	18
<b>6.</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>20</b>
<b>7.</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>20</b>
7.1	Entradas.....	20
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	20
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	21
7.1.3	Recarga inducida (Ri) .....	22
7.2	Salidas.....	23
7.2.1	Bombeo (B).....	23
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	23
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	24
7.3	Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ) .....	25
<b>8.</b>	<b>DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>26</b>
8.1	Recarga total media anual (R).....	26
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	27
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	27
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>29</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 Isla de Cozumel, definido con la clave 2305 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental de México, entre los paralelos 20°16' y 20°36' de latitud norte y los meridianos 86°43' y 87°02' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 502 km<sup>2</sup>. Por su condición geográfica de isla, está rodeada por Mar Caribe (figura 1).

Geopolíticamente, la totalidad de su extensión territorial pertenece a la porción insular del municipio de Cozumel, sus fronteras están definidas por la poligonal cuyos vértices se listan en la tabla 1.



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero.

ACUIFERO 2305 ISLA DE COZUMEL							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	87	1	18.2	20	24	55.9	DEL 1 AL 2 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	86	55	53.1	20	33	3.7	DEL 2 AL 3 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
3	86	53	57.1	20	33	56.9	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
4	86	51	59.2	20	32	21.6	DEL 4 AL 5 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
5	86	51	42.6	20	33	1.1	DEL 5 AL 6 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
6	86	48	18.6	20	33	22.1	DEL 6 AL 7 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
7	86	43	54.6	20	35	54.0	DEL 7 AL 8 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
8	86	45	52.9	20	30	51.3	DEL 8 AL 9 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
9	86	53	55.8	20	20	40.8	DEL 9 AL 10 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
10	86	59	37.2	20	15	55.9	DEL 10 AL 11 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
11	87	1	20.1	20	17	44.9	DEL 11 AL 12 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
12	87	1	52.4	20	21	49.7	DEL 12 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	87	1	18.2	20	24	55.9	

## 1.2 Situación Administrativa

El acuífero Isla de Cozumel pertenece al Organismo de Cuenca XII Península de Yucatán. En el acuífero rige el decreto de veda para la extracción de agua subterránea *“DECRETO por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del área que circunda los límites geopolíticos de los municipios de Benito Juárez y Cozumel, Quintana Roo y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo”* decretada el 11 de marzo de 1981 y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de marzo de 1981, a través del cual en la totalidad del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

En la región costera norte existe el sitio RAMSAR denominado “Manglares y Humedales del Norte de Isla Cozumel” establecido en el año 2009 y al sur-suroeste “Parque Nacional Arrecife de Cozumel” establecido en 2005.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En su territorio no existe ningún Distrito ni Unidad de Riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

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

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. Los únicos que abarcaron la superficie completa del acuífero son los que mencionan a continuación:

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ACUÍFERO PARA EXTRAER AGUA DULCE Y DETERMINAR EL MÁXIMO CAUDAL DE AGUAS SALOBRES PARA SU TRATAMIENTO FUTURO. Realizado en 2014 por Consultoría Betsco, S.A. de C.V., para la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA).** Mediante la realización de las actividades de campo, la ejecución de pruebas de bombeo y de sondeos geofísicos, se planteó la capacidad de extracción y determinar el máximo caudal.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA. Realizado en 2023 por la Dirección Local de Quintana Roo y la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua.**

## **3 FISIOGRAFÍA**

### **3.1 Provincia fisiográfica**

La Isla Cozumel está ubicada en la Provincia Fisiográfica denominada “Plataforma de Yucatán” (Raisz E., 1964), subprovincia “Costas Bajas”, que se caracteriza por su topografía muy plana y pedregosa, en la que existen algunas dolinas, sin drenaje superficial. Aunque la isla está despegada de la Península de Yucatán, presenta las mismas características topográficas de la región, dominadas por una topografía prácticamente plana, típica de una plataforma calcárea, con presencia de karsticidad, especialmente en las costas norte, sur y oriente. Su relieve es ligeramente ondulado en la mayor parte de su superficie, alternándose con áreas planas que presentan algunos lomeríos. En general, la altitud media de la isla es de 4 msnm, con una altura máxima de 11 msnm en su costa oriental.

### **3.2 Clima**

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados por E. García para las condiciones de México, se establece que en la superficie cubierta por el acuífero predomina el clima Am (f)(i) que lo define como cálido húmedo con lluvias en verano y otoño.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó información de la estación Cozumel y de tres más operadas por el organismo operador local Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), con registro histórico de 1987 a 2009. Debido a la característica de topografía plana, no existen variaciones importantes en los datos climatológicos. Con base en esta información se determinó que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son 24.7°C, 1270 mm y 1671 mm respectivamente. Los valores máximos de temperatura, mayores de 30 °C, se registran entre los meses de abril a julio, en tanto que las mínimas, menores de 20 °C, se presentan de noviembre a enero. La temporada de lluvias se presenta de mayo a diciembre, las máximas se registran entre los meses de julio a octubre, mientras que los meses más secos son abril y mayo.

La región se caracteriza por presentar fenómenos meteorológicos que la afectan durante la mayor parte del año; en el verano por la presencia de ondas tropicales: depresiones, tormentas y huracanes; durante el invierno por la incidencia de frentes fríos; que tienen un efecto directo en la recarga al acuífero, debido a la naturaleza kárstica del subsuelo.

### **3.3 Hidrografía**

Debido a su naturaleza calcárea, existen geoformas kársticas asociadas a sistemas de fracturamiento; dolinas (localmente llamados “cenotes” cuando se expone el nivel del agua subterránea al caer las bóvedas de las cavernas), uvalas y poljes. En la zona costera existen playas angostas y rocosas, playas semicirculares, caletas y descarga submarina de aguas subterráneas.

Debido a las características topográficas y a la alta permeabilidad de los materiales geológicos que predominan en la Isla de Cozumel, no se ha desarrollado algún tipo de drenaje que se pudiera considerar como corriente, el agua que se precipita en la superficie del terreno se infiltra rápidamente o se acumula en las zonas de inundación al norte y sur de la isla.

La elevada precipitación pluvial, aunada a la gran capacidad de infiltración del subsuelo y la escasa pendiente topográfica, favorece la renovación del agua subterránea de la isla; toda su superficie funciona como zona de recarga, propiciando que no existan escurrimientos superficiales o éstos tengan un recorrido muy corto.

### **3.4 Geomorfología**

La topografía de la región es muy suave, asociadas a formas kársticas de absorción. La isla presenta un relieve ligeramente ondulado en su mayor parte, alternándose con áreas planas con lomeríos someros, relativamente planos en su porción occidental y escarpados en sus costas norte y oriental.

Existen gran cantidad de dolinas, cenotes, microcúpulas kársticas, lagunas y llanuras de inundación, estas últimas con dimensiones de metros hasta kilómetros, presentando formas circulares, alargadas e irregulares; estas geoformas están asociadas a un fracturamiento manifestando hacia el área de Cobá, Yuc., el mayor grado de karsticidad, con una orientación muy variada, mientras que hacia la costa se manifiesta un lineamiento NE-SW.; en la línea de costa se presentan playas angostas y rocosas, playas semicirculares, caletas y manantiales marinos.

## **4. GEOLOGÍA**

El marco geológico regional está asociado a la provincia geológica Plataforma de Yucatán, constituida por rocas carbonatadas cuyas edades comprenden del Cenozoico al Reciente. En la Isla de Cozumel las rocas más antiguas son calizas y coquinas de edad Mioceno-Plioceno, que afloran ampliamente en Chemax, Chan Cenote, San Pedro Chemax, X-Can, Ignacio Zaragoza, Leona Vicario, Cobá, Tulum y Chumpón. Cubriendo a la unidad anterior existen depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada, constituida principalmente por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita de edad Pleistoceno. En las zonas costeras se presentan también depósitos lacustres constituidos por arcilla, lodo calcáreo, arena y limo de color negro con un alto contenido de materia orgánica; depósitos palustres constituidos por limo y arcilla mezclados con materia orgánica y depósitos de litoral conformados por fragmentos angulosos a subangulosos de ostras, bivalvos y gasterópodos que se observan en los litorales de la isla (figura 2).

Quintana Roo y el norte de Yucatán son geológicamente más jóvenes que el interior de la península y la costa campechana. La forma actual de la península se alcanzó a fines del Plioceno, hace unos cuatro millones de años; sin embargo, los farallones de

Tulum e Isla Mujeres se formaron durante el Holoceno, apenas unos 10 mil años, y se siguen formando arrecifes coralinos en la costa del Mar Caribe.

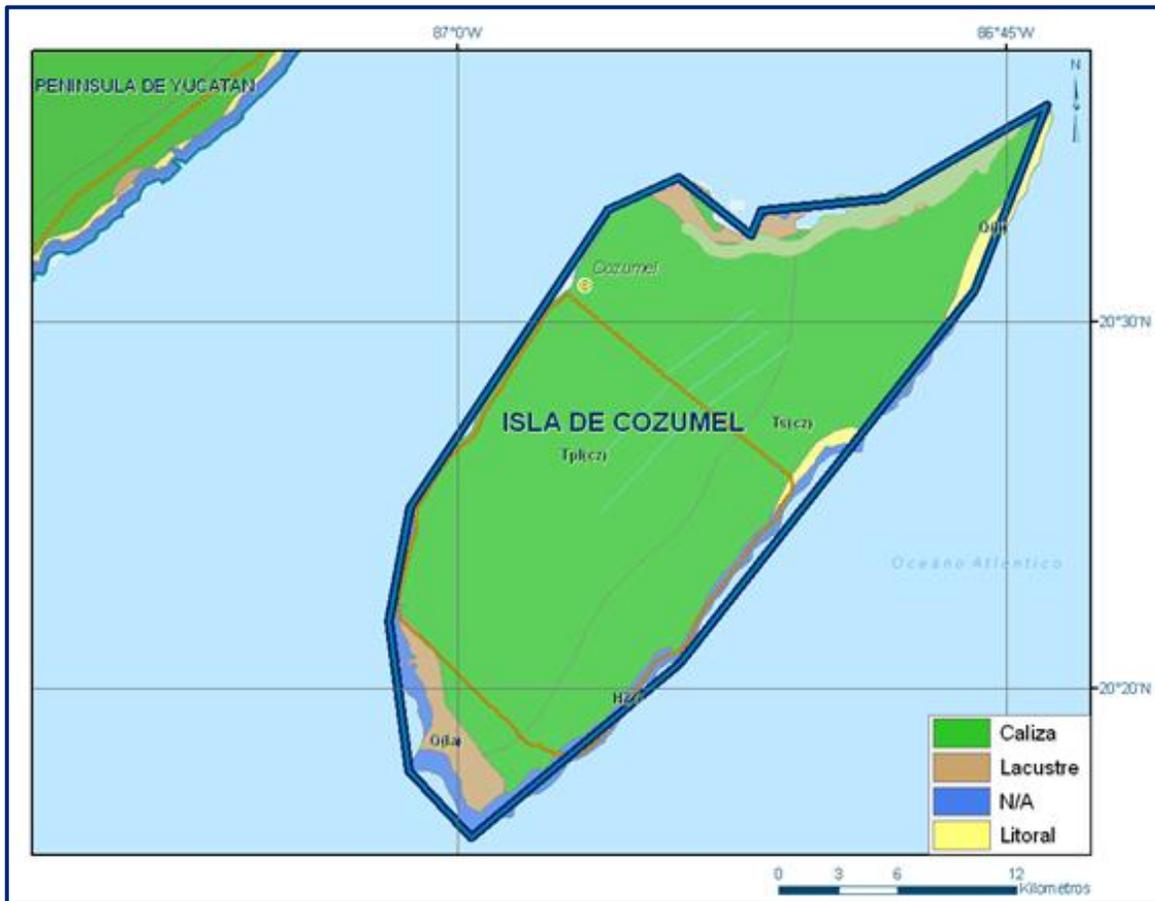


Figura 2. Geología del Acuífero

Desde el punto de vista estratigráfico, las rocas que afloran en la Isla de Cozumel se dividieron en tres formaciones correlacionables con parte de las rocas que constituyen la porción oriental de la Península de Yucatán, en donde se les conoce con el nombre de Formación Carrillo Puerto. La jerarquía litoestratigráfica de esta formación se elevó a la categoría de Grupo, subdividiéndola al menos para la parte aflorante de la Isla de Cozumel, en tres formaciones que se denominaron de la más antigua a la más joven: Chancanab, Abrigo y Mirador (SARH, 1989).

En los sondeos realizados en el estudio realizado por la SARH en 1989(2), se identificó, subyaciendo a estas formaciones, otro horizonte de calizas y dolomitas definido con el nombre de Formación Cozumel. A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que constituyen la columna estratigráfica, de la más antigua a la más reciente.

## **4.1 Estratigrafía**

La secuencia estratigráfica de la región en la que se localiza el acuífero está constituida por rocas calcáreas, cuya edad varía del Neógeno al Cuaternario. A continuación, se describen las unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente:

### **Terciario (Neógeno)**

#### **Formación Cozumel**

Con este nombre se designó a una serie de calizas y dolomitas que subyacen a la Formación Chancanab, agrupadas e identificadas en perforaciones exploratorias (SARH, 1989(2)). Están representadas por calizas y dolomitas de color verde oscuro, muy compactas y con estratificación delgada, cuyo espesor no fue posible determinar debido a que no se cortó su base. Por posición estratigráfica se le asigna una edad correspondiente al Oligoceno.

#### **Grupo Carrillo Puerto**

Fue definido por Bonet y Butterlin (1960, en SARH, 1989(2)) teniendo como localidad tipo un sitio ubicado sobre la carretera Peto-Carrillo Puerto, a 112 km de Peto; según los autores su espesor debe alcanzar varios centenares de metros. Los niveles inferiores están representados por coquinas ricas en Planeroplidae de un espesor aproximado de 1 m, cubiertas por calizas compactas que hacia los niveles superiores se vuelven cada vez más impuras, a veces arcillosas; la cima está representada por calizas blancas duras y masivas. Aflora ampliamente en el centro y oriente de la Península de Yucatán.

La edad de la fauna fósil que contiene es difícil de precisar. Debido a su posición estratigráfica entre la Formación Bacalar del Mioceno Superior y las calizas de Moluscos del Pleistoceno que la cubren concordantemente, se le asigna una edad correspondiente al Plioceno. Sin embargo, su base tal vez corresponda al Mioceno Superior, al igual que la Formación Bacalar. Por lo anterior se le asigna una edad Mioceno Superior-Plioceno. El grupo está conformado por las 3 siguientes formaciones:

#### **Formación Chancanab**

Con este nombre se conoce al paquete de calizas muy consolidadas que afloran en la Caleta localizada al norte del Hotel Presidente, ubicado en el kilómetro 6 de la carretera costera y a 2.5 km de la Laguna de Chancanab, en la Isla de Cozumel. El afloramiento es malo, por lo que su descripción se apoyó en los núcleos de pozos. Se

trata de un mudstone, con intercalaciones de calizas arcillosas, de color crema y gris que presenta oquedades de disolución de un tamaño promedio de 7 cm, recubiertas por aragonita de color amarillo y café claro. Presenta fósiles de *Strombus* sp. hasta de 20 cm de tamaño y se localiza en todo el subsuelo de la Isla.

Su espesor es de aproximadamente 20 m y su límite superior con la Formación Abrigo se identifica fácilmente al cambiar la litología a un grainstone fosilífero con muy poca disolución. Por correlación con las rocas que afloran en la costa oriental de la Península de Yucatán, su edad debe corresponder al Mioceno, su depósito ocurrió como parte de la Plataforma de Yucatán, en mares tranquilos de la zona batial, que muestran agitación al principio de su acumulación.

### **Formación Abrigo**

Corresponde a la secuencia de rocas carbonatadas, deleznales, que afloran en su localidad tipo definida en el Puerto de Abrigo Norte, ubicado a 2.5 km al norte del pueblo de San Miguel Cozumel. Está dividida en tres miembros:

Miembro Inferior. Consiste de sedimentos compactos y arenosos de calcarenita de color crema, con granos redondeados, que intemperizan a color gris oscuro con aspecto nodular, muy consolidadas y sin estratificación. En su localidad tipo tiene un espesor ligeramente superior a 2 m y no se observa su contacto con la Formación Chancanab, sobre la cual se depositó; por lo observado en otras localidades su espesor máximo alcanza 6 m.

Miembro Medio. Es una calcarenita constituida por fragmentos muy redondeados, con matriz de calcita fina de color crema, que intemperiza a gris oscuro. Presenta poca consolidación y estratificación cruzada, con delgadas capas de 3 a 4 mm. Su espesor es variable y en su localidad tipo se observa que alcanza de 70 a 80 cm. Este miembro local y regionalmente aparece con interrupciones y adelgazamientos laterales lenticulares.

Miembro Superior. Corresponde a una arenisca calcárea de color crema, que intemperiza a gris oscuro. Presenta un mayor grado de consolidación que los otros dos miembros y estratificación bien definida, a diferencia del miembro inferior que no la tiene. En ocasiones se encuentran, dentro de su secuencia, capas lenticulares de 10 a 20 cm de espesor con abundantes lamelibranquios.

El espesor total de la formación es de 8 a 9 m, de los cuales más o menos 6 m corresponden al Miembro Inferior, 0.8 al Miembro Medio y 2 m al Miembro Superior. La Formación Abrigo por considerarse parte del Grupo Carrillo Puerto, tiene una edad correspondiente al Plioceno.

### **Formación Mirador**

Está representada por un conjunto de calizas muy consolidadas y compactas, que afloran desde el kilómetro 12.7 de la Carretera Transversal hasta la costa oriental, donde existe un mirador. Se dividió en dos miembros:

Miembro Inferior. Es un cuerpo de calizas y areniscas compactas de color crema, que intemperizan a color café y gris oscuro. Presenta cierta estratificación y se caracteriza por su alto grado de consolidación, que al golpearlas con el martillo producen un típico sonido como el que genera una campana metálica.

Miembro Superior. Está constituido por sedimentos calcáreos compactos pero suaves, que se presentan de colores crema y café claro, e intemperizan a color café y gris oscuro. Tiene estratificación gruesa y también produce un sonido metálico al golpearlo con martillo.

Su espesor promedio es de 10 m, de los cuales 3 m corresponden al Miembro Inferior y 7 m al Miembro Superior. Se le asigna una edad correspondiente al Plioceno.

### **Cuaternario**

Los sedimentos pertenecientes al cuaternario se encuentran representados principalmente por depósitos lacustres constituidos por arcillas, lodos calcáreos, arenas y limos de color negro con un alto contenido de materia orgánica, que se observan en las zonas de inundación. Los depósitos de litoral están representados por médanos de arena blanca acumulados en la zona costera, formadas por la acción combinada del viento y oleaje. Están compuestos principalmente de fragmentos angulosos a subangulosos de ostras, bivalvos y gasterópodos, que se observan en los litorales de la isla en forma de fajas alargadas, principalmente en la costa oriental, cuyas dimensiones alcanzan hasta 5 m de altura y 400 m de ancho. Los depósitos palustres están constituidos por limo y arcilla mezclados con materia orgánica, de escaso espesor; que se presentan en zonas inundadas por aguas salobres, donde crece abundante vegetación manglar; se localizan en áreas aisladas en el extremo norte, centro y suroeste, a lo largo de la costa del Mar Caribe.

## **4.2 Geología del subsuelo y estructural**

De acuerdo con la información de los registros litológicos de los pozos, la interpretación de los estudios geofísicos y las evidencias de campo, es posible identificar que el acuífero está constituido, en su porción superior en zonas cercanas a la costa, por sedimentos granulares, palustres y litorales depositados en las zonas topográficamente más bajas y en la planicie costera; la porción inferior se aloja en rocas sedimentarias carbonatadas que presentan karsticidad.

Las rocas que afloran se encuentran prácticamente sin deformación significativa; sin embargo, es posible observar a nivel afloramiento ligeras ondulaciones. Utilizando imágenes de satélite, ortofotos, modelo digital de elevación e imagen radar, es posible detectar algunos lineamientos que fueron interpretados como posibles fallas normales con dirección NE-SW derivadas de una tectónica distensiva. Estas fallas conforman la Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón, la cual está delimitada al poniente por los lineamientos El Ideal, San Luis, Yokdzonot, Punta Laguna, Chanchén y San Pedro, mientras que en su extremo oriente está delimitada por los lineamientos Tulum, Pozo, Constituyentes, Juárez y Agua Azul. Esta depresión afecta a las rocas de la Formación Carrillo Puerto, se prolonga en una longitud aproximada de 122 km, con un ancho de 25 km en el norte y 42 km en la porción suroeste.

La evolución tectónica de la provincia geológica denominada Plataforma de Yucatán, está ligada a la apertura del Golfo de México, iniciando en el Triásico Superior, con la ruptura del supercontinente Pangea, en la margen sur de la placa de Norteamérica, evento que continuó durante el Jurásico Inferior y Medio. Durante el Kimmeridgiano, el Bloque Yucatán se desplaza hacia el SE a través de un sistema de fallas dextrales que separaban las plataformas de Yucatán y Florida, propiciando condiciones para la acumulación de carbonatos; en el Tithoniano se depositan las facies de carbonatos arcillosos y en el Cretácico Inferior en aguas más o menos profundas se depositan calizas. Entre el Cretácico Medio y Superior ocurre una gran transgresión marina en casi toda la superficie de México, mientras que en el Bloque Yucateco se depositaba un paquete potente de rocas evaporíticas. Los efectos de la Orogenia Laramide no se registran en las rocas de la Plataforma de Yucatán, en esa misma época se depositaron predominantemente carbonatos con cantidades menores de evaporitas (particularmente durante el Paleoceno y Eoceno) alcanzando espesores que varían de 100 a 2000 m. Desde el Terciario hasta el Reciente, el nivel del mar ha oscilado varias veces, como consecuencia de ello las facies sedimentarias depositadas varían entre plataforma somera hasta evaporíticas restringidas, en ambiente de supramarea.

Durante el Pleistoceno y el Holoceno los efectos de una transgresión han dado lugar a depósitos recientes caracterizados por zonas de pantanos y de bioclastos derivados de las unidades más antiguas (Carta Geológica-Minera F16-11 "Cozumel", escala 1:250000. SGM 2006).

La Isla de Cozumel constituye la parte emergida de un pilar estructural, limitado por dos grandes fallas normales paralelas al litoral oriental de la Península. Los elementos estructurales que conforman la Isla de Cozumel son el anticlinal de Cozumel, la falla normal occidental y la falla normal oriental. En los bordes oriental y occidental se localizan fallas normales que propiciaron la formación de un pilar tectónico que al ir emergiendo dio origen a la isla.

La Isla Cozumel, por su alineación tectónica preferencial, conforma una estructura de plegamiento anticlinal al que se la ha denominado "Anticlinal Isla de Cozumel", cuyo eje está orientado en dirección NE-SW, buzando hacia ambos extremos, limitado en sus flancos oriental y occidental por dos fallas normales que la cortan. El eje de plegamiento está orientado en el mismo sentido de uno de los dos ejes tectónicos regionales peninsulares, que se han definido también como accidentes geológicos de fracturamiento que favorecen los fenómenos de disolución. Estos alineamientos tienen sus manifestaciones a lo largo de la costa oriental de la Península de Yucatán y están evidenciados por la existencia de la fosa marina que bordea la Isla hacia el oeste, en la que se han desarrollado una serie de fallas escalonadas identificadas en los estudios magnetométricos realizados por Petróleos Mexicanos y por el alineamiento persistente del Río Hondo, la Laguna de Bacalar y las Bahías de Chetumal y La Ascensión, en la porción oriental de la Península. Al estar limitada por las fallas normales, cuya orientación es sensiblemente paralela a la costa oriental de la Península de Yucatán, el bloque levantado o "horst" es que el que representa la isla (SARH, 1989; SARH, 1989(2)).

En la Península de Yucatán se han realizado más de 100 estudios de exploración geofísica mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), sin embargo, por tratarse de estudios en proyectos de pequeñas dimensiones no se plasmaron en el mapa correspondiente. Sin embargo, por considerarse los más relevantes por la importancia para los programas Hidroagrícolas de la Península de Yucatán, cabe destacar en el estado de Campeche, el estudio realizada en el valle de "Yohaltún", "Zona Cañera" en el estado de Quintana Roo y el estudio de "Ayim-Blanca Flor" en Yucatán. Con estos estudios se definieron las características del subsuelo en forma indirecta y con base a

ello se determinaron las unidades que presentan condiciones favorables de permeabilidad y aquellas en las que prevalece material arcilloso con condiciones poco favorables o nulas en cuanto a permeabilidad.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la geología superficial, permiten establecer que el acuífero insular es de **tipo libre**, con presencia de **condiciones locales de semiconfinamiento** debido a la existencia de las areniscas calcáreas y calcilutitas de la Formación Abrigo, conformando un medio heterogéneo y anisotrópico. Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por depósitos clásticos de granulometría variada y sedimentos litorales y palustres, únicamente en las franjas costeras norte, oriental y sur de la isla; en su porción inferior por rocas carbonatadas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución. Esta última es la unidad que conforma el acuífero regional y su espesor principal es de algunas centenas de metros, su permeabilidad es muy alta debido a que su naturaleza kárstica provoca la abundancia de oquedades y conductos de disolución, que muestran una distribución muy irregular.

De acuerdo con su permeabilidad, es posible agrupar las distintas litologías en las unidades hidrogeológicas que a continuación se describen, las cuales conforman el medio poroso o granular y el medio fracturado y kárstico por el que se desplaza el agua subterránea:

I) Depósitos granulares no consolidados de permeabilidad media a alta. Están integrados por sedimentos clásticos de origen litoral y palustre, de granulometría variada y de escaso espesor, depositados en algunas depresiones topográficas y en la zona costera. La porosidad y permeabilidad es de tipo intergranular, por lo que esta unidad constituye el medio poroso o granular.

II) Rocas carbonatadas de permeabilidad media a alta. A esta unidad pertenecen las rocas calizas y dolomitas que conforman la Isla Cozumel, cuya permeabilidad está determinada por su fracturamiento y disolución. Constituyen el acuífero regional que se explota actualmente, su aprovechamiento sólo está restringido por la alta salinidad que en ocasiones presenta por efecto del ingreso de agua marina y/o debido a la contaminación con aguas residuales.

III) Rocas y sedimentos de baja permeabilidad. A esta unidad pertenecen las calizas arcillosas y margas que forman parte de la secuencia del Grupo Carrillo Puerto, que cuando se presentan libres de impurezas incrementan su permeabilidad. También se incluyen los depósitos lacustres y palustres que se localizan en las zonas de inundación.

El movimiento del agua subterránea en el medio granular está controlado por las variaciones de permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en el medio kárstico depende del grado de disolución y fracturamiento.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

De acuerdo con los resultados de la interpretación por métodos convencionales de las pruebas de bombeo y aforos de corta duración, realizadas en estudios previo, así como y valores del caudal específico, se determinaron valores de transmisividad de  $0.2 \times 10^{-3}$  a  $1.0 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ . Por correlación hidrogeológica con la porción oriental de la Península de Yucatán, se adoptan valores de conductividad hidráulica de 0.02 a 16038 m/día ( $2.31 \times 10^{-7}$  a  $1.86 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ ), obtenidos en el estudio realizado por el Gobierno del estado de Quintana Roo en el 2010. Los valores más altos corresponden al flujo a través de cavidades y huecos asociados con la doble porosidad típica de las calizas kársticas de la región y los valores más bajos están asociados a depósitos de menor granulometría o al caliche producto de la alteración de las calizas. Es por esta razón que, hasta los 9 m de profundidad, en general, la permeabilidad es muy baja y se refleja en caudales de extracción muy bajos.

En los estudios realizados por la SARH (1989) y CONAGUA (1991) se mencionan valores de transmisividad y conductividad hidráulica de  $1.4 \text{ m}^2/\text{s}$  y 1500 m/día respectivamente.

No existe información de los valores de coeficientes de almacenamiento; sin embargo, la medición de la porosidad efectiva da una idea de su magnitud. Se considera que este valor varía de 15% a 55% con un valor medio equivalente a 33%, obtenidos por Brewerton (1993), en la zona la porción norte de la Península de Yucatán.

## **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información de diferentes años; sin embargo, debido a que para los últimos años se cuenta con mayor información piezométrica, para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2005-2023.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2023 muestra que los valores variaban de 1 a 6.5 m. Los niveles más someros, de 1 a 3 m, se registraron en la región costera. Los valores de mayor profundidad, de 4 a 6.5 m, se presentan en su porción central y central-sur (figura 3).

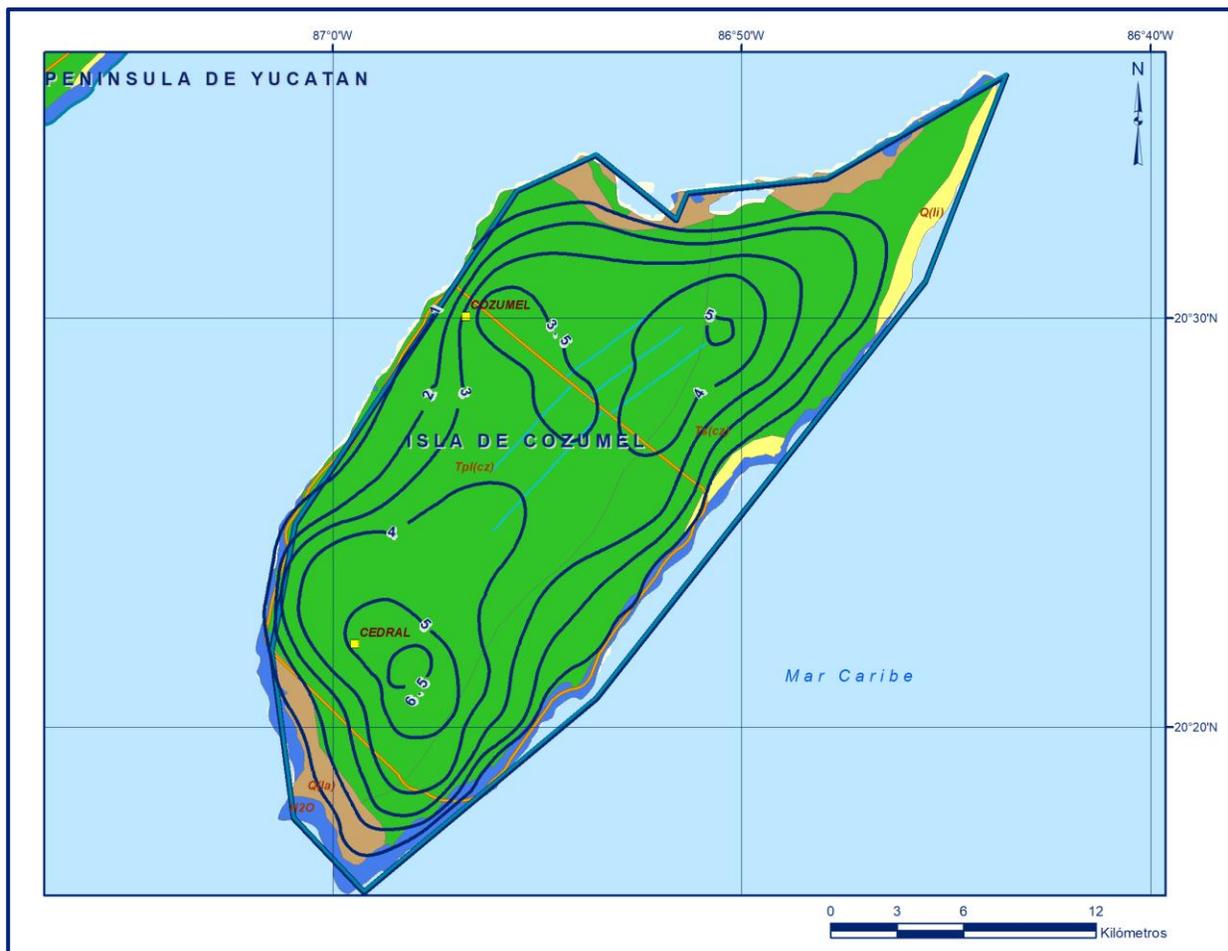


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2023)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2023 presentó valores que variaron de 0.5 a 3.0 msnm. Las mayores elevaciones se registran hacia el centro del acuífero. Los valores máximos, de 2.0 a 3.0 msnm, se midieron en la población El Cedral. Las menores elevaciones, de 0.5 a 1.8 msnm, se presentan en la línea de costa. La dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una orientación radial hacia el mar (figura 4).



Figura 4 Elevación del nivel estático en msnm (2023)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2005-2023 no registró cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea; en la parte central de la zona de explotación se registraron recuperaciones. Los valores de recuperación varían de 0 a 1 m, que representan un promedio anual de 0.5 m. Hacia la parte suroeste se tienen conos de abatimiento del orden de 1 a 2 m que posiblemente son generados por la extracción de agua para abastecimiento de agua potable (figura 5).



Figura 5 Evolución anual del nivel estático en m (2005-2023)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

El agua subterránea del acuífero Isla de Cozumel es del tipo cálcica y sódica bicarbonatada o clorurada. De manera general, los valores de concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) variaron de menos de 500 mg/l a mayores de 3000 mg/l. La salinidad del agua subterránea se incrementa a lo largo del patrón de flujo desde el centro de la isla hacia la costa.

El agua del acuífero se clasifica como agua dulce que contiene menos de 2000 mg/l de STD, bajo este lente de agua dulce se encontró y delimitó un horizonte de aguas salobres, cuya concentración varía entre los 2000 y 5000 mg/l de STD. Estos horizontes se encuentran sobre agua más salada que contiene concentraciones de más de 5000 mg/l. Debido a la presencia de la cuña de agua marina que subyace al acuífero, el espesor saturado de agua dulce es reducido, de 14 a 28 metros, encontrándose el máximo valor hacia el centro de la isla.

Dentro del área ocupada por la cuña de agua marina, la influencia de las mareas y el movimiento de la superficie del agua subterránea, da lugar a la formación de una zona de mezcla que contiene agua con mayor salinidad, cuya amplitud aumenta hacia el litoral y que en la faja costera reduce en varios metros el espesor de agua de calidad aprovechable.

La calidad del agua subterránea es el factor que limita el aprovechamiento del acuífero, especialmente por el reducido espesor de agua dulce y por el riesgo de provocar el ascenso del agua salada subyacente; lo que impone severa restricción a los abatimientos permisibles en los pozos y por tanto a sus caudales de extracción.

La operación de las captaciones provoca el ascenso de agua salobre contenida en esa zona de mezcla, pudiendo aumentar con ello la salinidad del agua subterránea hasta altas concentraciones, que rebasan el límite máximo permisible para consumo humano. En la porción costera del acuífero, este fenómeno inutiliza temporal o permanentemente a los pozos que no son adecuadamente diseñados y operados, considerando el reducido espesor de agua dulce.

Las condiciones hidrogeológicas del acuífero propician la contaminación del agua subterránea, ya que las oquedades del terreno kárstico de alta permeabilidad, así como la ausencia de un medio poroso que sirva de material filtrante y la escasa profundidad del nivel del agua subterránea, facilitan el acceso de los contaminantes al subsuelo y su rápida propagación en el acuífero. Por ello, el acuífero Isla de Cozumel, es sumamente vulnerable a la contaminación, es decir, que por sus características es muy susceptible a ser adversamente afectado por contaminantes que causen cambios químicos, físicos o biológicos y que consecuentemente las concentraciones de distintos parámetros rebasen los límites máximos permisibles para consumo humano, establecidos en 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. Por lo que se debe controlar, regular o, en su caso, limitar el desarrollo de actividades potencialmente contaminantes que pongan en riesgo la calidad del agua subterránea.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **18.6 hm<sup>3</sup> anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022, de los cuales 8.3 hm<sup>3</sup>/año (44.6%) son para uso público-urbano, 8.0 hm<sup>3</sup>/año (43.0%) para uso servicios, 2.1 hm<sup>3</sup>/año (11.3%) para satisfacer las necesidades del uso industrial y 0.2 hm<sup>3</sup>/año (1.1%) son para usos múltiple.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2005-2023, en una superficie de **473 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y, que corresponde a la totalidad del acuífero. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

### 7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre principalmente por infiltración de agua de lluvia que se precipita sobre la Isla de Cozumel y debido a la gran permeabilidad que presenta ya que se infiltra rápidamente al subsuelo sin dar lugar a la formación de corrientes superficiales originando una topografía kárstica.

#### 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Este término es uno de los que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con 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:

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R<sub>v</sub>**: Recarga Vertical
- E<sub>h</sub>**: Entradas subterráneas por flujo horizontal
- R<sub>i</sub>**: Recarga inducida
- B**: Bombeo
- S<sub>h</sub>**: Salidas subterráneas por flujo horizontal
- ETR**: Evapotranspiración
- ΔV(S)**: Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

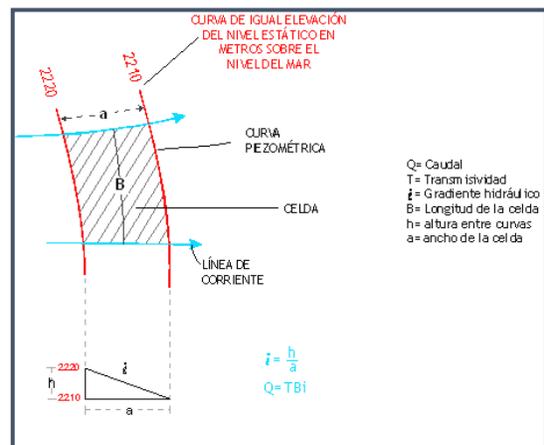
### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E<sub>h</sub>)

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 piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Para el cálculo de entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2023, mostrada en las figuras 4. 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:

$$Q = B * i * T$$

Donde:

- Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)
- B** = Longitud de la celda (m)
- i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)
- T** = Transmisividad (m<sup>2</sup>/s)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de las celdas definidas. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **18.0 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2023)

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	1174	423	0.2	0.0005	0.0600	0.0333	1.1
E2	1227	506	0.2	0.0004	0.0600	0.0291	0.9
E3	1402	800	0.2	0.0003	0.0600	0.0210	0.7
E4	1117	730	0.2	0.0003	0.0600	0.0184	0.6
E5	2028	1455	0.2	0.0001	0.0600	0.0167	0.5
E6	2153	796	0.2	0.0003	0.0600	0.0325	1.0
E7	2789	586	0.2	0.0003	0.0600	0.0571	1.8
E8	1985	626	0.2	0.0003	0.0600	0.0381	1.2
E9	3068	871	0.2	0.0002	0.0600	0.0423	1.3
E10	1884	1325	0.2	0.0002	0.0600	0.0171	0.5
E11	1646	742	0.2	0.0003	0.0600	0.0266	0.8
E12	3676	780	0.2	0.0003	0.0600	0.0566	1.8
E13	3085	644	0.2	0.0003	0.0600	0.0575	1.8
E14	2178	558	0.2	0.0004	0.0600	0.0468	1.5
E15	2651	792	0.2	0.0003	0.0600	0.0402	1.3
E16	3488	1089	0.2	0.0002	0.0600	0.0384	1.2
<b>TOTAL</b>							<b>18.0</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 en cada zona.

### 7.1.3 Recarga inducida (Ri)

El volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 8.3 hm<sup>3</sup>, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y debido a que la profundidad al nivel del agua subterránea son someras, un 30 % 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; el volumen de recarga de este tipo es de 2.5 hm<sup>3</sup> anuales. Por lo tanto **Ri = 2.5 hm<sup>3</sup> anuales**.

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), evapotranspiración (ETR), y de manera natural se presentan salidas subterráneas (Sh) en la mayor parte del acuífero.

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **18.6 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

Las salidas por flujo subterráneo se calcularon de la misma manera que las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático 2023, mostrada en la figura 4. El cálculo se muestra en la tabla 3. El volumen total estimado es de **26.2 hm<sup>3</sup> anuales**.

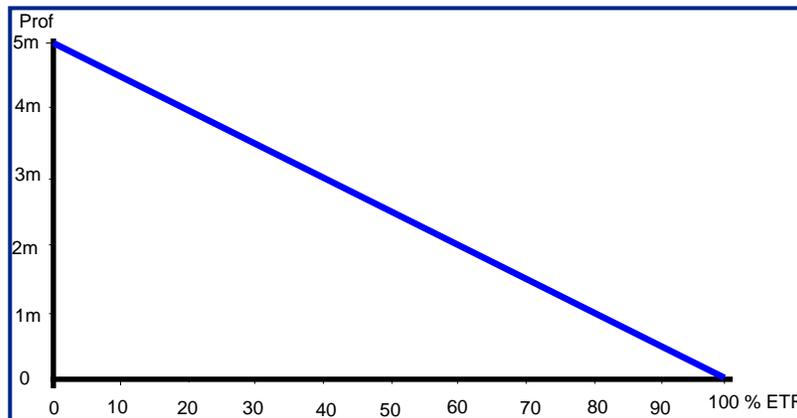
Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2023).

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	2764	2210	0.5	0.0002	0.0150	0.0094	0.3
S2	2500	1636	0.5	0.0003	0.0150	0.0115	0.4
S3	2988	1426	0.5	0.0004	0.0150	0.0157	0.5
S4	4575	1045	0.5	0.0005	0.0150	0.0328	1.0
S5	2716	875	0.5	0.0006	0.0150	0.0233	0.7
S6	3577	600	0.5	0.0008	0.0150	0.0447	1.4
S7	4128	950	0.5	0.0005	0.0150	0.0326	1.0
S8	3269	693	0.5	0.0007	0.0150	0.0354	1.1
S9	4545	676	0.5	0.0007	0.0150	0.0504	1.6
S10	4144	920	0.5	0.0005	0.0150	0.0338	1.1
S11	3235	900	0.5	0.0006	0.0150	0.0270	0.9
S12	3600	166	0.5	0.0030	0.0150	0.1627	5.1
S13	4280	872	0.5	0.0006	0.0150	0.0368	1.2
S14	2717	1235	0.5	0.0004	0.0150	0.0165	0.5
S15	3515	740	0.5	0.0007	0.0150	0.0356	1.1
S16	3620	820	0.5	0.0006	0.0150	0.0331	1.0
S17	3900	750	0.5	0.0007	0.0150	0.0390	1.2
S18	3500	564	0.5	0.0009	0.0150	0.0465	1.5
S19	2450	650	0.5	0.0008	0.0150	0.0283	0.9
S20	2900	700	0.5	0.0007	0.0150	0.0311	1.0
S21	3450	1020	0.5	0.0005	0.0150	0.0254	0.8
S22	3370	1270	0.5	0.0004	0.0150	0.0199	0.6
S23	2790	1100	0.5	0.0005	0.0150	0.0190	0.6
S24	3778	1365	0.5	0.0004	0.0150	0.0208	0.7
<b>TOTAL</b>							<b>26.2</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 toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

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



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 147.7 hm<sup>3</sup>/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración real

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
5 a 4	4.5	88.4	1.0448	5	0.1	9.2
4 a 3	3.5	132.0	1.0448	5	0.3	41.4
3.5	3.5	16.5	1.0448	5	0.3	5.2
3 a 2	2.5	74.7	1.0448	5	0.5	39.0
2 a 1	1.5	72.4	1.0448	5	0.7	52.9
	Total	384.0				147.7

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2005-2023 (figura 5). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.3, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**$\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -38.7 hm<sup>3</sup>, por lo que el promedio anual es de **-2.2 hm<sup>3</sup>**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2005-2022)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	$S_y$	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
1	1	15.6	0.3	4.7
0.5 a 1	0.75	13.8	0.3	3.1
0 a 0.5	0.25	15.3	0.3	1.1
-1 a -2	-1.5	43.3	0.3	-19.5
0 a -1	-0.5	122.7	0.3	-18.4
-1	-1	17.8	0.3	-5.3
-2	-2	7.3	0.3	-4.4
	<b>TOTAL</b>	<b>235.8</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-38.7</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>-2.2</b>

### Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones (Rv), mediante la expresión que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 18.6 + 26.2 + 147.7 - 2.2 - 18.0 - 2.5 \\ R_v &= 169.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total es la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + R_i + E_h \\ R &= 169.8 + 2.5 + 18.0 \\ R &= 190.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 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:

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

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. Para este caso, su valor es de **190.3 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 este caso, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **100.1 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 26.2 hm<sup>3</sup> anuales corresponde a las salidas subterráneas que aún presenta el acuífero para impedir el avance de la intrusión marina y 73.9 hm<sup>3</sup> anuales al 50% de la evapotranspiración, que se debe comprometer para preservar el ecosistema costero de las lagunas, esteros, zonas naturales protegidas y sitios RAMSAR.

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

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **19'543,924 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 2022**.

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 190.3 - 100.1 - 19.543924 \\ \text{DMA} &= 70.656076 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **70'656,076 m<sup>3</sup> anuales.**

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), 2014 “Evaluación de la capacidad del acuífero para extraer Agua dulce y determinar el máximo caudal de aguas salobres para su tratamiento futuro”. Consultoría Betsco, S.A. de C.V.

CNA, 1994 “Manual para evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos”, Hidrolegro, S.C. (Editor), México, D.F.

Duch, J. 1991 “Fisiografía del estado de Yucatán, su relación con la Agricultura”, Primera Edición, Universidad Autónoma de Chapingo, México, D.F.

Méndez, R.R., 1991 “Modelo de comportamiento del acuífero en la ciudad de Mérida”, Comisión Nacional del Agua. Mérida Yuc., Méx.

SARH, 1989. “Sinopsis Geohidrológica del Estado de Quintana Roo”, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos., México, D.F.

Duch, J., 1989 “La conformidad Territorial del Estado de Yucatán”, 211, Universidad Autónoma de Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán.

Butterlin, J. Y Bonnet, F., 1963 “Mapas Geológicos de la Península de Yucatán”. Revista Ingeniería Hidráulica en México, México, D.F.

Bonet y Butterlin, 1962, “Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula2. New Orleans Geological Society, New Orleans, USA.

David Keith Todd, 1959a, “Groundwater Hidrology, N.Y., p. 180, John Wiley & Sons, Inc. London, Chapman and Hall, Ltd.