



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO PENÍNSULA DE YUCATÁN (3105),
ESTADO DE YUCATÁN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. GENERALIDADES..... | 3 |
| Antecedentes..... | 3 |
| 1.1 Localización..... | 3 |
| 1.1 Situación administrativa del acuífero | 5 |
| 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD | 7 |
| 3. FISIOGRAFÍA | 8 |
| 3.1 Provincia fisiográfica | 8 |
| 3.2 Clima..... | 9 |
| 3.3 Hidrografía..... | 10 |
| 3.4 Geomorfología | 12 |
| 4. GEOLOGÍA..... | 12 |
| 4.1 Estratigrafía..... | 14 |
| 4.2 Geología estructural..... | 16 |
| 4.3 Geología del subsuelo | 18 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA..... | 21 |
| 5.1 Tipo de acuífero | 21 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos | 22 |
| 5.3 Piezometría..... | 22 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico | 22 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático..... | 22 |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático | 23 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático..... | 24 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea..... | 25 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA..... | 26 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS | 26 |
| 7.1 Entradas..... | 27 |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv) | 27 |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)..... | 28 |
| 7.1.3 Recarga incidental (Ri) | 29 |
| 7.2 Salidas..... | 30 |
| 7.2.1 Bombeo (B)..... | 30 |
| 7.2.2 Evapotranspiración (ETR) | 30 |
| 7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)..... | 31 |
| 7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm) | 32 |
| 7.2.5 Descarga a través de flujo base (Dfb) | 32 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)..... | 33 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 34 |
| 8.1 Recarga total media anual (R) | 34 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)..... | 34 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) | 35 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 35 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 37 |

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 Península de Yucatán, definido con la clave 3105 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental de la República Mexicana y abarca los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, entre los paralelos 17° 49' 00" y 21° 36' 00" de latitud norte y entre los meridianos 86° 45' 00" y 91° 20' 00" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 124,409 km².

Limita al sur con el acuífero Valles Centrales, perteneciente al estado de Quintana Roo, y con Xpujil, perteneciente al estado de Campeche; al suroeste con Boca del Cerro y Los Ríos, pertenecientes al estado de Tabasco, al norte y al oeste con el Golfo de México, al sur con Guatemala y Belice, y al este con el Mar Caribe (figura 1).

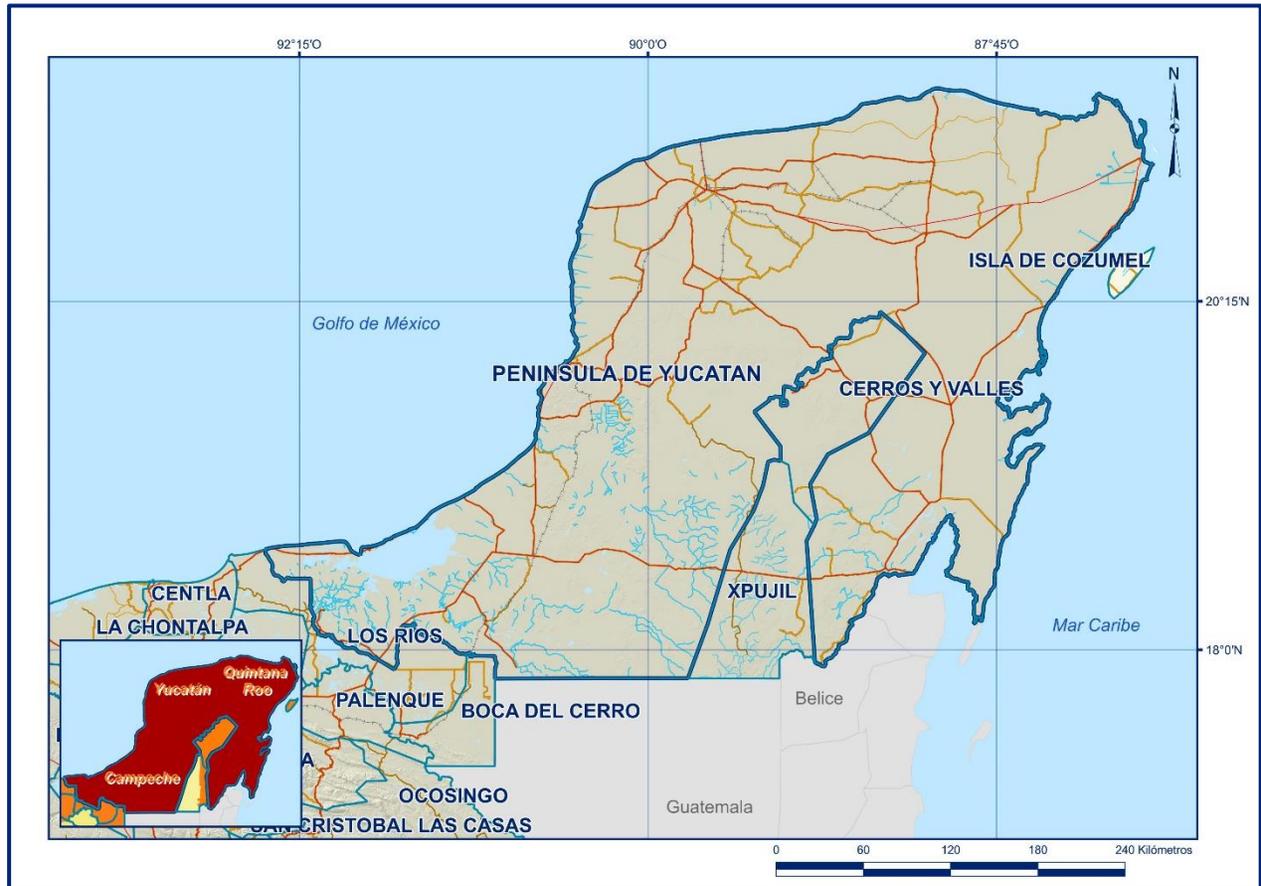


Figura 1. Localización del acuífero.

Geopolíticamente, comprende 125 municipios, 11 pertenecientes al estado de Campeche, ocho al estado de Quintana Roo y 106 al estado de Yucatán.

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 3105 PENINSULA DE YUCATAN | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|--|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 91 | 10 | 13.0 | 17 | 58 | 33.3 | DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 2 | 92 | 28 | 5.3 | 18 | 39 | 0.0 | DEL 2 AL 3 POR LA LINEA DE |
| 3 | 88 | 18 | 56.0 | 18 | 29 | 6.3 | DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE INTERNACIONAL |
| 4 | 88 | 55 | 20.0 | 17 | 55 | 11.6 | |
| 5 | 88 | 58 | 36.3 | 18 | 42 | 11.7 | |
| 6 | 88 | 55 | 33.1 | 18 | 48 | 18.7 | |
| 7 | 88 | 54 | 42.3 | 18 | 50 | 42.5 | |
| 8 | 88 | 57 | 13.4 | 19 | 4 | 8.0 | |
| 9 | 88 | 50 | 24.2 | 19 | 15 | 41.1 | |
| 10 | 88 | 34 | 38.0 | 19 | 23 | 54.1 | |
| 11 | 88 | 12 | 46.0 | 19 | 54 | 51.8 | |
| 12 | 88 | 20 | 18.3 | 20 | 2 | 33.0 | |
| 13 | 88 | 30 | 10.6 | 20 | 10 | 59.6 | DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 14 | 89 | 8 | 38.7 | 19 | 13 | 7.7 | |
| 15 | 89 | 11 | 10.1 | 19 | 13 | 36.9 | |
| 16 | 89 | 13 | 28.8 | 19 | 12 | 53.1 | |
| 17 | 89 | 15 | 27.1 | 19 | 3 | 38.7 | |
| 18 | 89 | 19 | 1.7 | 18 | 54 | 4.5 | |
| 19 | 89 | 28 | 11.4 | 18 | 38 | 48.1 | |
| 20 | 89 | 36 | 49.9 | 18 | 10 | 7.8 | |
| 21 | 89 | 44 | 34.6 | 17 | 48 | 58.0 | DEL 21 AL 22 POR EL LIMITE INTERNACIONAL |
| 22 | 90 | 59 | 16.4 | 17 | 48 | 49.9 | DEL 22 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 1 | 91 | 10 | 13.0 | 17 | 58 | 33.3 | |

1.1 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Península de Yucatán pertenece al Organismo de Cuenca XII “Península de Yucatán”, Consejo de Cuenca “Península de Yucatán”, instalado el 14 de diciembre de 1999: y en menor proporción, en la región suroeste, en el estado de Campeche al Consejo de Cuenca “Ríos Grijalva y Usumacinta”, instalado el 11 de agosto de 2000.

Su territorio se encuentra parcialmente vedado y está sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda; el primero es el “Decreto por medio del cual se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la Delegación de Payo Obispo, Q. Roo”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 07 de mayo de 1964, esta veda se clasifica como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros; el segundo es el “Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en una zona comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de Campeche, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona” publicado en el Diario Oficial de la Federación el 10

de diciembre de 1975. El tercero es el *“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”* publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23 de marzo de 1981, esta veda se clasifica como tipo II que sólo permite extracciones para usos domésticos; y el cuarto es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los límites geopolíticos del Estado de Yucatán.”* publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de septiembre de 1984, esta veda se clasifica como tipo II que sólo permite extracciones para usos domésticos.

La porción no vedada del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”*, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El área del acuífero comprende la existencia de 18 sitios RAMSAR, tres en la región suroeste del acuífero denominados *“Pantanos de Centla (Tabasco)”*, *“Área de protección de flora y fauna de la Laguna de Términos”* y *“Playa Tortuguera Chenkán”*; cuatro al noroeste denominados *“Reserva de la biosfera los Petenes”*, *“Reserva de la biosfera Celestún”*, *“Reserva estatal El Palmar”* y *“Anillo de Cenotes”*; en la región centro y centro-este del acuífero el denominado *“Bala’an K’aax”*; en la región centro norte el sitio denominado *“Parque estatal Lagunas de Yalahau”*; al este el sitio denominado

“Playa Tortuguera X’cachel-X’cachelito”; cinco al noreste denominados “Dzilam (Reserva Estatal)”, “Ría Lagartos (Yucatán)”, “Área de protección de flora y fauna Yum Balam”, “Manglares de Nichupté”, “Otoch Ma’ax Yetel Kooh” y “Parque nacional Arrecife de Puerto Morelos”; y al sureste dos sitios denominados “Sian Ka’an” y “Parque nacional Arrecifes de Xcalak”.

La superficie del acuífero además comprende 21 Áreas Naturales Protegidas, de las cuales 12 son sitios RAMSAR y los otros nueve son: “Reserva de la Biosfera de Arrecifes de Sian Ka’an” en la zona este, “Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano” en la punta noreste del acuífero, “Parque Nacional Costa Occ. de I. Mujeres, Pta. Cancún y Pta. Nizuc” al noreste, “Reserva de la Biosfera Tiburón Ballena” al noreste, “Parque Nacional Tulum” al este, “Área de protección de flora y fauna de Uaymil” al sureste, en el estado de Quintana Roo; “Reserva de la Biosfera Calakmul” al sur, en el estado de Campeche; “Parque Nacional Dzibilchantún” al norte y “Playa adyacente a la localidad denominada Río Lagartos” al noreste, en el estado de Yucatán.

El uso principal del agua es el agrícola. En la porción norte de su territorio se localiza el distrito de riego DR 048 “Ticul” y al sureste el DR 102 “Río Hondo”, el cual también queda comprendido por el acuífero Xpujil; actualmente no se ha instalado el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado diversos estudios geohidrológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

IMPLEMENTACIÓN DE RED PIEZOMÉTRICA EN LA ZONA PONIENTE DEL ESTADO DE YUCATÁN. Realizado en noviembre de 2009 por Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología y Hidráulica Costera I.C. para la Comisión Nacional del Agua. Sus objetivos fueron contar con infraestructura de medición confiable y en puntos estratégicos que permitan la observación del acuífero y su evolución; contar con información confiable respecto a niveles piezométricos, cargas hidráulicas y calidad del agua del acuífero en puntos estratégicos que permitan la toma de decisiones para su conservación; y contar con información del subsuelo que permita definir la columna estratigráfica del sitio y su correlación con otras regiones.

ESTUDIO DE REACTIVACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA EN EL ACUÍFERO DE PENÍNSULA DE YUCATÁN (TRAMO COBA-TULUM EN LA REGIÓN COSTERA NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO). Elaborado por Asesoría, Consultoría y Administración, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.

Sus objetivos fueron contar con infraestructura de medición que permita determinar los niveles de agua subterránea de la zona; conocer la condición del agua subterránea, así como las tendencias que pueden ser inducidas por causas naturales o antropogénicas; contar con información estratigráfica de la zona que permita su correlación con otra ya disponible para mejorar el conocimiento del acuífero y plantear mejores alternativas para el emplazamiento de nuevas zonas de captación de agua potable, así como para regular la explotación y aprovechamiento del acuífero; y construir dos nuevas estaciones de monitores, rehabilitación de tres estaciones de monitoreo, nivelación de cinco brocales y equipamiento de cinco sitios para la medición automática de los niveles del agua subterránea en la zona.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Península de Yucatán se encuentra en su mayoría dentro de la provincia fisiográfica Península de Yucatán, y una pequeña porción al suroeste en el estado de Campeche dentro de la provincia Llanura Costera del Golfo Sur.

La provincia fisiográfica Península de Yucatán, ocupa en su totalidad la superficie del territorio de los estados de Yucatán y Quintana Roo, y parcialmente la del estado de Campeche. Tiene la forma de un gran bloque y está formada por una plataforma calcárea de origen marino, con extensa plataforma continental bajo las aguas del Golfo de México y un abrupto talud vertical, sin plataforma continental, bajo las aguas del Caribe. Este bloque comenzó a emerger sobre las aguas marinas durante el Oligoceno, hace aproximadamente 26 millones de años.

Al sur del estado de Yucatán se tiene como principal rasgo fisiográfico la Sierrita de Ticul, es una delgada alineación de lomas y cerros bajos con orientación NW-SE, una extensión de 110 km, y altitudes que alcanzan los 250 msnm; separa la topografía del estado de Yucatán en dos partes: hacia el sur se aprecia una serie de lomeríos con pequeños valles hasta de 150 msnm; hacia el norte se observa una extensa planicie con una pendiente que va desde los 50 m hasta el nivel del mar. Otro de los rasgos más notables es la escasa presencia de drenaje superficial, con excepción de la corriente superficial del río Champotón, así que el drenaje es casi en su totalidad subterráneo,

mismo que ha originado una red subterránea de cavernas, en la cual es común la presencia de estructuras colapsadas e inundadas a las que se les conoce como cenotes y la presencia de hondonadas que se anegan principalmente en la época de lluvias, a las cuales se les conoce localmente como “aguadas”.

La provincia fisiográfica Península de Yucatán, abarca las subprovincias Carsos y Lomeríos de Campeche al sur y oeste del acuífero, Carso Yucateco al norte y noreste, y Costa Baja de Quintana Roo al sureste del acuífero.

La subprovincia Carso Yucateco es la de mayor extensión, constituida por rocas calizas y presencia de fósiles, principalmente de ambiente arrecifal; se caracteriza por presentar relieve plano, presenta abundantes estructuras de hundimiento o dolinas conocidas localmente como “aguadas” y estructuras de colapso inundadas o cenotes. La subprovincia Carso y Lomeríos de Campeche presenta relieve ligeramente ondulado debido a la presencia de lomeríos que alternan con hondonadas o llanuras que lo distinguen de las zonas aledañas, está constituida mayormente por calizas cársticas del Paleoceno y Eoceno. Dentro de esta subprovincia se localiza la Sierrita de Ticul, donde la mayor elevación se ubica en el Cerro Benito Juárez; dentro de esta subprovincia se encuentran 9 sistemas de topofomas más. La subprovincia Costa Baja de Quintana Roo limita al este con el Mar Caribe y al sur con el Río Hondo, destacan en el extremo oriental lagunas costeras que alternan con las bahías de Ascensión al norte, Espíritu Santo al este y al sur la Bahía de Chetumal; esta subprovincia la conforman ocho sistemas de topofomas, cinco tipos de llanuras y tres playas o barras, los suelos son poco profundos y mayormente salinos.

Parte de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur se localiza en la región suroeste del acuífero Península de Yucatán, y comprende parte de la subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños, ésta presenta las características de zonas de inundación, donde los suelos están completamente saturados y contienen una gran cantidad de materia orgánica.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes para el acuífero Península de Yucatán son: al suroeste en una pequeña porción cercana a la Laguna de Términos prevalece el clima Am(f), que corresponde a cálido húmedo; Aw₂(x') correspondiente al clima cálido subhúmedo, se ubica al sur del estado de

Campeche, en los alrededores de la Laguna de Términos, y en una franja que va del noreste al sureste en la región costera del estado de Quintana Roo; el clima Aw_1 corresponde a cálido subhúmedo y se localiza en la zona suroeste y centro norte del acuífero. El clima $Aw_1(w)$ corresponde a cálido subhúmedo, se ubica al oeste en una pequeña porción costera dentro del estado de Campeche; Aw_0 se localiza en un área que se extiende del suroeste al noroeste, corresponde a cálido subhúmedo y comprende la zona más alta del acuífero que es la "Sierrita de Ticul"; el clima $Aw_0(w)$ ubicado al oeste en una pequeña porción costera, corresponde a cálido subhúmedo. $Aw_0(x')$ al noreste y al sureste en una pequeña porción cercana a la Laguna de Bacalar, que corresponde a cálido subhúmedo; y $Aw_1(x')$ que corresponde al clima cálido subhúmedo, ubicado en una franja que va del noreste al sureste del acuífero. El clima cálido (A) presenta temperaturas que van de los 22 a los 26° C y puede variar dependiendo del porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual, y del índice de humedad, que es el valor que resulta del cociente de precipitación sobre temperatura.

El clima $BS_1(h')w$ correspondiente a semiseco muy cálido, se localiza en una pequeña porción costera al noroeste; el $BS_1(h')w(x')$ ubicado en una franja al norte del acuífero, corresponde a semiseco muy cálido; $BS_0(h')w(x')$ que corresponde a semiseco muy cálido, se localiza en una pequeña franja costera al norte del acuífero. Las variaciones en el tipo de clima seco (B) puede variar dependiendo del valor de temperatura y del índice de humedad.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 50 estaciones climatológicas que tienen influencia dentro del área del acuífero, cuyo registro comprende un periodo 1986- 2020. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial medias anuales de **1128 mm, 26.2 °C y 1153 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero Península de Yucatán se ubica dentro de cuatro regiones hidrológicas, al suroeste la Región Hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta, Subregión Hidrológica No. 30D Grijalva-Usumacinta, cuencas San Pedro, Usumacinta, Palizada, San Pedro y San Pablo, Laguna del Este, Laguna de Términos, Mamatel, Cumpán, Laguna del Pom y Atasta, Alto Río Candelaria y Bajo Río Candelaria. Al oeste la Región Hidrológica No. 31 Yucatán Oeste, Subregión Hidrológica Yucatán Oeste, cuencas Río Champtón 1, Río Champtón 2, Campeche, Arroyo Siho, Calakmul, Vicente Guerrero y La Malinche. Al

norte la Región Hidrológica No. 32 Yucatán Norte, Subregión Hidrológica Yucatán Norte, cuencas Yucatán y Río Verde. Y al sureste la Región Hidrológica No. 33 Yucatán Este, Subregión Hidrológica Yucatán Este, cuencas Río Escondido, Agua Dulce, Arroyo Azul, Laguna Bacalar, Chinchancanab y Chunyaxche.

Dentro de la Región Hidrológica No. 30 las principales corrientes superficiales son los ríos Candelaria, Chumpán y Palizada, que desembocan en la Laguna de Términos, esta laguna es la que abarca mayor superficie dentro del área del acuífero; también se localizan las lagunas De Carlos y Santa Gertrudis. Además, se encuentran las subcuencas R. Usumacinta, R. San Pedro, R. Palizada, R. San Pedro y San Pablo, L. de Términos, L. de Pomi y Atasta, L. del Este, R. Chumpán, R. Candelaria, Varias, R. Caribe y R. Mamantel.

Dentro de la Región Hidrológica No. 31 la principal corriente superficial es el río Champotón, que desemboca al norte de la ciudad Champotón; los principales cuerpos de agua son la Laguna Chama, la Laguna Silvituc o Noh Laguna, ubicada a un costado de la ciudad de Silvituc en Campeche. Además, se encuentran las subcuencas R. Noahabín, R. La Gloria y L. Noh, Dzibalchén, Toop, Varias y R. Champotón.

La Región Hidrológica No. 32 no cuenta con corrientes superficiales importantes, debido al tipo de terreno presente, que permite la infiltración del agua al subsuelo. El principal rasgo hidrológico de esta región es la presencia de cenotes, localizados al noroeste del estado de Yucatán en forma de anillo, y de manera diseminada al noreste del mismo estado y al norte de Quintana Roo. Además, se encuentran las subcuencas Quintana Roo y Mérida.

Dentro de la Región Hidrológica No. 33 la principal corriente superficial es el río Hondo que desemboca en la Bahía de Chetumal, este río funge como límite internacional con el país vecino Belice; sus afluentes más importantes son el río Bravo proveniente de Belice, el río Azul proveniente de las sierras de Guatemala y el arroyo Ucúm proveniente de Quintana Roo. Algunos de los principales cuerpos de agua en esta región hidrológica son las lagunas Campechen, Chunyaxché, Santa Rosa y Mosquitero al noreste, y la Laguna Bacalar al sur. Además, se encuentran las subcuencas Varias, Bahías La Ascensión y Espíritu Santo, Bahía de Chetumal, R. Hondo, R. Escondido, L. Chunyaxché y varias, Xpechil - Felipe Carrillo Puerto - Chunhubab, Ycactúm, L. Paiyagua; y "Becanchén, L. Chinchancanab, Loché, Xkanha, Sin nombre".

De acuerdo con información del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), el área del acuífero contiene cinco clases de dales, el palustre que se presenta en mayor proporción, y tiene presencia en los tres estados que abarca el acuífero, principalmente en de estado de Campeche; el estuario, el cual se encuentra en la región costera de los tres estados que componen el acuífero; el fluvial presente en el estado de Campeche principalmente y en Quintana Roo en menor proporción; el lacustre y los creados. Los humedales son clasificados según los *“Lineamientos para la clasificación de Humedales”*, dicha clasificación considera los hábitats con condiciones hidrológicas, geomorfológicas, químicas o biológicas similares y los agrupa en sistemas.

3.4 Geomorfología

El área del acuífero Península de Yucatán está constituida por cuatro tipos de geoformas: llanuras, lomeríos, playas o barras, y una pequeña sierra. Las llanuras son las que cubren la mayor parte de la superficie, exceptuando la región suroeste y sur centro. Los lomeríos son del tipo alto, bajos y con llanuras; el lomerío de tipo alto se localiza en la porción suroeste del acuífero, se caracteriza por presentar relieve más pronunciado que el de las áreas que lo circundan; los lomeríos bajos alternan con hondonadas o con llanuras, en el caso de los segundos desarrollan algunas corrientes que conectan algunos cuerpos de agua superficial. Las playas o barras se localizan en todo el perímetro del estado de Yucatán, en algunas zonas costeras del estado de Quintana Roo, en la zona costera al norte del estado de Campeche y en la Laguna de Términos. La pequeña sierra fallada o “Sierrita Ticul” corresponde al rasgo más destacado de la superficie del acuífero, se extiende en una franja con orientación noroeste-sureste de poco menos de tres kilómetros de ancho, la elevación promedio es de 200 m, destacando el cerro Benito Juárez con una altura de 210 m.s.n.m.

Dentro de la superficie del acuífero hay una gran cantidad de dolinas, cenotes, micro cúpulas kársticas y lagunas; estas geoformas están asociadas a un fracturamiento que hacia el área de Cobá en el estado de Yucatán, manifiesta el mayor grado de carsticidad, con una orientación muy variada, mientras que hacia la costa se manifiesta un lineamiento NE-SW.

4. GEOLOGÍA

La geología general que aflora en la zona que comprende el acuífero Península de Yucatán está constituida por rocas sedimentarias principalmente calcáreas, y depósitos no consolidados, cuya distribución geográfica se muestra en la figura 2.

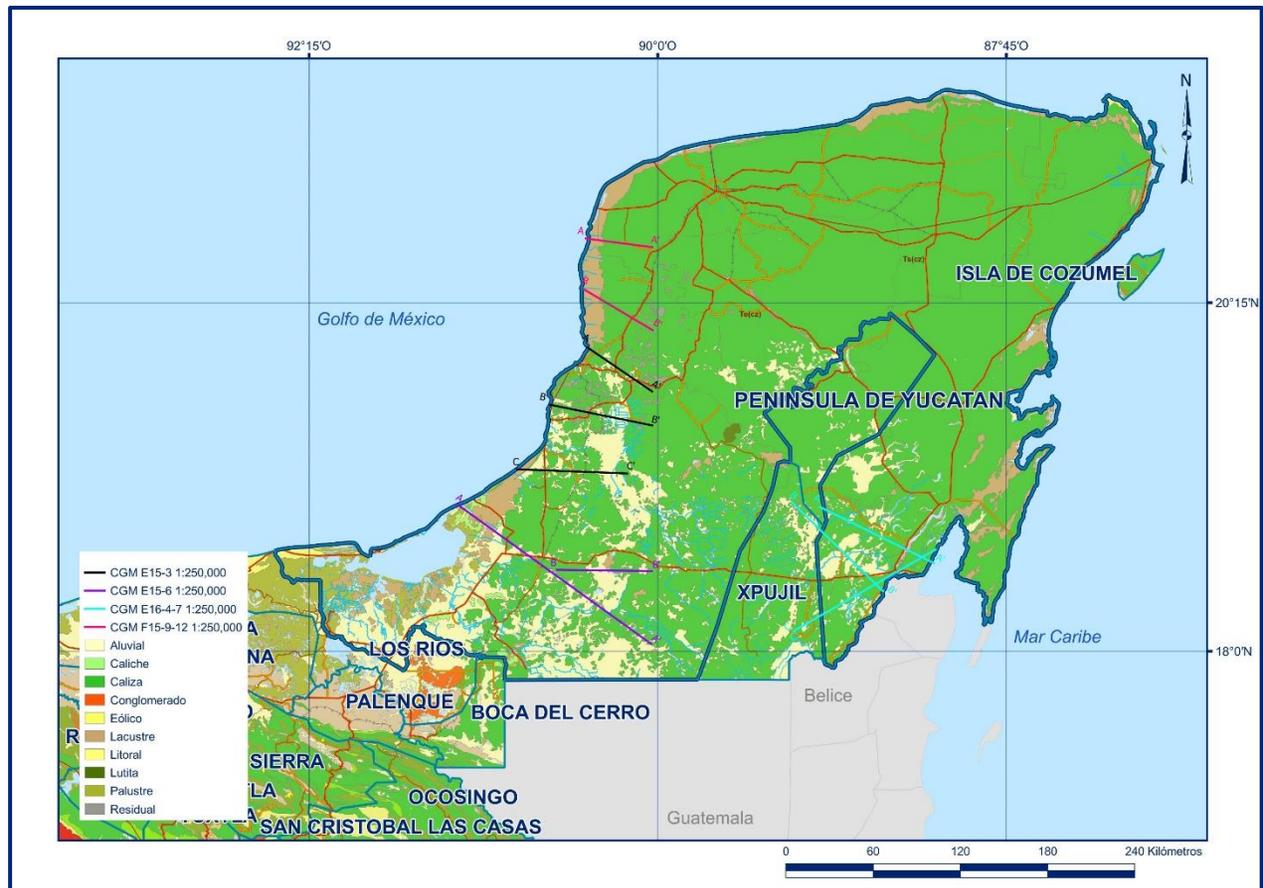


Figura 2. Geología general del acuífero

La historia geológica de la Plataforma de Yucatán está ligada a la apertura del Golfo de México, iniciando en el Triásico Superior, con la ruptura del supercontinente Pangea, evento que continuó durante el Jurásico Inferior y Medio. Durante el Kimmeridgiano, el bloque Yucatán se desplazó hacia el SE a través de un sistema de fallas dextrales que separaban las plataformas de Yucatán y Florida, y ocurrieron las invasiones de aguas marinas del Golfo de México que permitieron la acumulación de carbonatos.

En el Tithoniano continuaba el movimiento del Bloque Maya y se depositaban carbonatos arcillosos. A principios del Cretácico Inferior, el Bloque Maya alcanzó su actual posición, originando ambientes de aguas someras que propician el depósito de carbonatos. Entre el Cretácico Medio y Superior ocurre una transgresión marina que permitió el depósito de potentes espesores de carbonatos de plataforma que se extendió por todo México, mientras en el Bloque Maya se depositaba un paquete potente de rocas evaporíticas.

A finales del Maastrichtiano y hasta el Eoceno Inferior se produjo el levantamiento provocado por la Orogenia Laramide, originando que, en la margen continental del Golfo de México, la Sierra Madre Oriental emergiera por plegamiento y fallamiento y al pie de la misma se formarían una serie de cuencas y subcuencas (cuencas terciarias de Veracruz, Tabasco y Campeche). Estas cuencas se rellenaron con sedimentos provenientes de la Sierra Madre Oriental, mientras que en la Plataforma de Yucatán se depositaron predominantemente carbonatos con cantidades menores de evaporitas particularmente en el Paleoceno y Eoceno, alcanzando espesores que varían de 100 a 2,000 m.

Desde inicios del Cenozoico hasta el reciente, el nivel del mar ha oscilado varias veces, generando rocas de plataforma somera hasta evaporíticas restringidas. Durante el Pleistoceno y el Holoceno los efectos de una etapa transgresiva dieron lugar a depósitos recientes caracterizados por zona de pantanos y de bioclastos derivados de las unidades más antiguas.

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 Mioceno al Holoceno. A continuación, se describen las unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente:

PALEÓGENO

PALEOCENO

Formación Icaiché

Es la unidad más antigua que aflora en la región del acuífero, se presenta al oeste en la porción sur y centro, así como en la parte central y centro-sur. Está constituida principalmente por caliza cristalina dolomitizada y silicificada, con intercalación o niveles de yeso y margas, contiene también esporádicos nódulos y bandas delgadas de pedernal, así como brecha calcárea con abundantes horizontes de sílice, horizontes de arcillas y fragmentos de sílice.

EOCENO

Formación Chichen Itzá

Esta formación cubre concordantemente a la Formación Icaiché, aflora en la porción oeste y centro de la región del acuífero, se observa en las localidades del estado de Yucatán como, Muna, Ticul, Tzucacab y Pisté entre otras. Se encuentra constituida por un paquete de rocas carbonatadas conformado por grainstone, wackestone, margas

que en algunos horizontes contienen nódulos y pequeñas bandas de sílice, y brechas calcáreas con escasos horizontes arcillosos y de sílice.

OLIGOCENO

Cubriendo a la Formación Chichen Itzá, afloran rocas constituidas por un paquete de mudstone, grainstone y boundstone. Se distribuye en un área muy restringida en la porción central del estado de Yucatán.

NEÓGENO

MIOCENO

Formación Estero Franco

Aflora en la porción sureste de la región del acuífero, en el estado de Quintana Roo, está constituida por calizas y dolomías que cambia de facies lateralmente a la Formación Bacalar formada por caliza; y sobreyace discordantemente a la Formación Chichen Itzá.

MIOCENO-PLIOCENO

Formación Carrillo Puerto

Sobreyace discordantemente a la Formación Chichen Itzá, y concordantemente a la Formación Estero Franco. Está conformada por una secuencia de caliza y boundstone (coquina), que en algunos horizontes se interestratifica con brecha calcárea. En la porción sureste del acuífero, en el estado de Quintana Roo, consiste en grainstone, packstone, boundstone con intercalación de brecha calcárea. Al noreste del acuífero esta secuencia se encuentra constituida por mudstone, wackestone, grainstone, packstone, boundstone y brechas calcáreas. Algunos afloramientos se pueden observar en Chemax, Chan Cenote, San Pedro Chemax, X-Can, Ignacio Zaragoza, Leona Vicario, Coba, Tulum y Chumpón.

CUATERNARIO

PLEISTOCENO

En esta época, dependiendo de la región del acuífero afloran diferentes tipos de litologías; en la porción suroeste del acuífero, en el estado de Campeche, aflora una unidad de coquina de bioclastos, que hacia el norte se compone de bioclastos y conglomerado polimictico con clastos de caliza, coquina, brecha y sílice cementados en una matriz bioclástica constituida por fragmentos de conchas y calcita, intercalada con calcarenitas y coquina, denominada Unidad Bioclastos Seybaplaya.

En una pequeña porción al suroeste del acuífero se encuentra la Formación Tierra Colorada, conformada por pequeños afloramientos de conglomerado polimíctico y arenisca. En la porción norte-centro del acuífero sobreyaciendo de forma concordante a la Formación Carrillo Puerto se encuentra un paquete sedimentario, constituido por roca de textura clástica constituida por cristales finos de calcita y horizontes de conchas mal consolidados.

Al noreste del acuífero se encuentran depósitos de arenisca poco consolidada, constituida principalmente por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita, que se encuentran en afloramientos aislados que son paralelos a la costa del Mar Caribe, entre Cancún y Alfredo V. Bonfil. Al sureste del acuífero, sobreyaciendo concordantemente a la Formación Carrillo Puerto, se encuentra la arenisca de oolitos cementados entre sí, grainstone y boundstone.

HOLOCENO

Las rocas anteriormente descritas se encuentran cubiertas de manera discordante, parcial e indistintamente por depósitos no consolidados. Materiales lagunares, conformados por limo, arcilla y bioclastos mezclados con materia orgánica. Depósitos aluviales, constituidos por arcilla, limo, arena y grava calcárea. Depósitos lacustres, formados por sedimentos finos y fango calcáreo, con alto contenido de materia orgánica, depositados en lagunas someras separadas del mar por un cordón litoral o por una barrera calcárea. Depósitos de litoral, sedimentos no consolidados sujetos al oleaje del mar, que están constituidos por arena fina a gruesa y algunas gravas y fragmentos de conchas; en algunos horizontes consisten en arena con bioclastos de coral, espículas de equinodermos, gasterópodos, ostracodos, pelecípodos y esponjas. Depósitos palustres, constituidos por arcilla, limo, arena, sales y materia orgánica en descomposición, en algunos casos mezclados con tallos y raíces. En las franjas costera del Mar Caribe y del Golfo de México los depósitos litorales están constituidos por arena blanca, compuesta principalmente de fragmentos subredondeados a arredondeados de ostras, bivalvos y gasterópodos.

4.2 Geología estructural

En general las rocas que afloran no exhiben deformaciones significativas y sus estratos conservan inclinaciones con tendencias a la horizontal, sin embargo, los estratos presentan ligeros a moderados ondulamientos en los estratos de las rocas, atribuible al basculamiento de estratos por movimientos extensivos; además, algunas fallas normales provocan ligeros basculamientos locales.

En la porción noreste del acuífero la deformación frágil está representada por una sola falla de tipo normal, denominada Falla Campeche-Hecelchakán, con una traza de 45 km de longitud, rumbo N30° E, echado de 60° NW y pitch de 50° NW; localmente se observa la superficie del espejo de falla con estrías, fracturamiento, brechas y cataclasitas.

Además, se detectan lineamientos interpretados como posibles fallas normales con dirección NE-SW derivadas de una tectónica distensiva, los que conforman la Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón, la cual está delimitada, al poniente por el lineamiento El Ideal, San Luis, Yokdzonot, Punta Laguna, Chanchén y San Pedro, mientras que en su extremo oriente está delimitada por el lineamiento Tulum, Pozo, Constituyentes, Juárez y Agua Azul. Se interpretó en una longitud aproximada de 122 km, con un ancho de 25 km en el norte, haciéndose más amplia hacia la porción suroeste con un ancho de 42 km, afecta a rocas de la Formación Carrillo Puerto.

Otra característica importante de esta región del acuífero es la presencia de cenotes dispuestos en forma semicircular, lo cual se considera un reflejo del cráter Chicxulub que se originó por impacto de un meteorito hace 60 millones de años.

En la porción oeste, la deformación frágil está representada por la falla normal denominada Campeche - Hecelchakán, que afecta a las rocas de las formaciones Chichen Itzá y Carrillo Puerto expuesta en una longitud de 48 km con rumbo NE 55° SW y echado de 75° al NW, manifestando en su traza la presencia de brecha cataclástica y ocasionalmente estrías que ratifican el sentido normal. Así mismo a escala de afloramiento se observó fallamiento normal en bloques que afecta a la Formación Chichen Itzá cuyo origen se interpreta por efecto de una tectónica distensiva. Además, en esta misma región, por efecto de las aguas meteóricas que facilita la disolución de la caliza se han formado estructuras carsticas como dolinas que al colapsarse generan estructuras mayores denominadas poljes, como el del Valle de Edzna que consiste en un valle intermontano orientado NE-SW relleno por aluvión, de aproximadamente 60 km de largo y ancho entre 5 a 30 km.

En la porción sur, la deformación frágil está representado por una falla regional denominada Río Hondo, que presenta una dirección de NE 25° SW con echados de 50° a 89° al NW con una longitud de 75 km, que afecta a rocas sedimentarias de las formaciones Estero Franco, Bacalar y Carrillo Puerto. Además, se documentó un lineamiento denominado Chetumal, que presenta una dirección de NE 26° SW y cuya

traza presenta una longitud de 40 km, afectando a rocas de la Formación Carrillo Puerto. Así como la existencia del polje denominado Desempeño que consiste en un valle intermontano con una orientación NW-SE, con longitud de 35 km y un ancho de 15 km abarcando un área de aproximadamente 550 km².

En la porción centro norte y sur con apoyo de imágenes de satélite y de radar fueron interpretadas fallas normales y algunos lineamientos. La Falla Ticul que es una estructura regional con una longitud de 130 km y un rumbo general de NW 50° SE; su presencia se manifiesta como una brecha cataclástica de 4 m de ancho, constituida por fragmentos calcáreos angulosos de 1 a 5 cm, inmersos en una matriz areno arcillosa con abundantes óxidos de fierro, afectando y poniendo en contacto a las formaciones Carrillo Puerto y Chichen Itzá.

El lineamiento Ocom tiene un rumbo general NW 50° SE y una longitud de 18 km, corresponde a un arroyo que desemboca en la laguna Ocom, afectando a la Formación Carrillo Puerto; el lineamiento Las Palmas con rumbo general NW 60° SE y una longitud de 20 km, afectando a la Formación Carrillo Puerto; el lineamiento Petén Tunic se interpreta con una longitud de 26 km, en una dirección general de NE 25° SW, afectando a la Formación Icaiché; el lineamiento La Oyanca se interpreta con una longitud de 35 km y una orientación general de NE 25° SW, se intercepta en su extremo noreste con la falla Ticul y afecta a las formaciones Icaiché y Carrillo Puerto; el lineamiento Nohbec se interpreta con una longitud de 20 km orientado NE 25° SW y choca con la traza de la falla Ticul, afectando a la Formación Carrillo Puerto; el lineamiento Chacchooben, localizado al sur de la Laguna Nohbec, se interpreta con una longitud de 13 km y rumbo general de NE 45° SW, interceptándose con la traza de la Falla Ticul; el lineamiento Sian Ka An se interpreta con una longitud de 7 km y una orientación general de NE 25° SW.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con información de cortes litológicos de pozos, sondeos geofísicos, evidencias de geología superficial e información de estudios previos realizados en la zona, fue posible definir las características geológicas del subsuelo del acuífero.

En la región noroeste del acuífero, la cual queda comprendida en la zona costera del estado de Yucatán, en una franja paralela a la línea de costa, que abarca el transecto que va de Mérida a Progreso; el acuífero está constituido por tres capas, la primera una costra calcárea (caliche) de conductividad hidráulica baja, la segunda conformada por

calizas arcillo-limosas (sascab) que cambia a profundidad a arenas calcáreas (calcarenitas) de conductividad hidráulica media-baja; y finalmente, la tercera capa que corresponde a una caliza arrecifal de conductividad hidráulica alta.

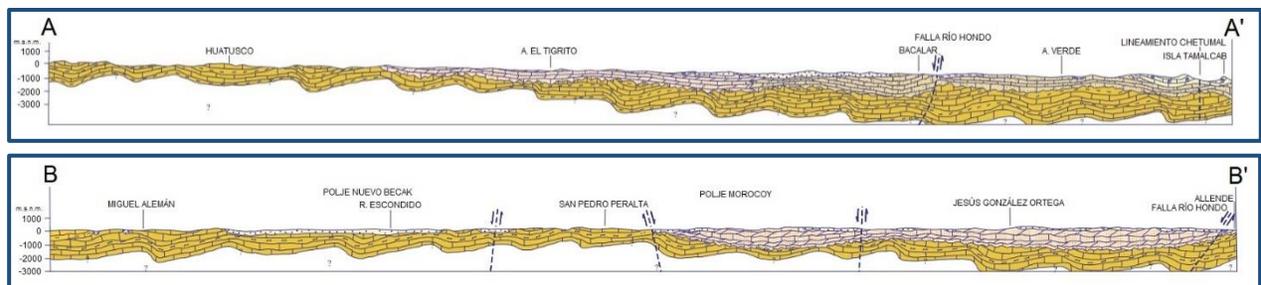
La capa superficial de caliche presenta dos edades, Pleistoceno y Mioceno-Plioceno, con espesores que van de los 0.5 a los 5 metros; la correspondiente al Pleistoceno está compuesta por caliza compacta con espesores que varían de 0.5 a 3 metros, se encuentra en una franja de entre 5 y 10 kilómetros de ancho en las inmediaciones de los puertos de Chuburna, Progreso y Chicxulub, que se comporta como una capa semiconfinante haciéndose más gruesa hacia el este y disminuyendo hacia el oeste; hacia el sur esta capa cambia a caliza alterada con fósiles y rasgos de disolución, presenta espesores de 0.7 a 5 metros que corresponde a la formación Carrillo Puerto de edad Mioceno-Plioceno. La segunda capa subyace a la caliza de la formación Carrillo Puerto, es una caliza arcillo-limosa (sascab) de baja conductividad hidráulica que a profundidad cambia a calcarenitas de conductividad hidráulica media; esta capa se comporta como un acuífero no confiado, ya que la capa de caliche que la sobreyace es una caliza alterada con rasgos de disolución que permite la entrada del agua. La tercera capa es una caliza con conchas (caliza arrecifal) de alta conductividad hidráulica, hacia el norte subyace a la caliza compacta del Pleistoceno y se comporta como semiconfinado, ya que la capa de caliche funciona directamente como una capa semiconfinante, hacia el sur la caliza arrecifal subyace a las calcarenitas, esta capa es la que aloja al acuífero, tiene un espesor promedio en la zona de descarga al mar de 9 metros y aumenta hacia el continente, en Mérida hasta los 44 metros y en Sotuta hasta los 80 metros.

La región ubicada al noreste del acuífero está conformada por rocas calizas del Eoceno correspondientes a la formación Chichen Itzá, dispuestas en estratos de medianos a gruesos con alta permeabilidad, debido al fracturamiento y disolución; del Oligoceno y del Mioceno-Plioceno correspondientes a la formación Carrillo Puerto, en la porción central y al norte del Cordón Puuc en Yucatán, en esta zona el acuífero tiene un espesor promedio de 110 metros. En el estado de Quintana Roo, dentro de los municipios de José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Solidaridad, Lázaro Cárdenas y Benito Juárez está conformada por rocas calizas de origen marino pertenecientes a la formación Felipe Carrillo Puerto de edad Mioceno-Plioceno que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, en esta zona el acuífero tiene un espesor promedio de 19 metros.

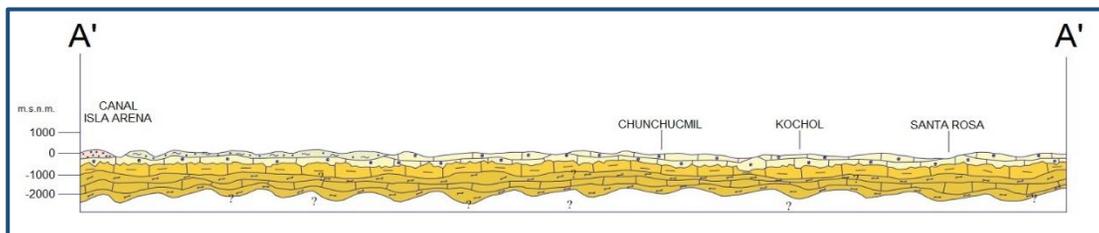
La región sureste que comprende las bahías de Chetumal, Espíritu Santo, Ascensión, la zona costera de Playa del Carmen hasta Cancún y la costa norte del estado de Quintana Roo; está compuesta por calizas del Mioceno-Plioceno correspondientes a la formación Carrillo Puerto, así como por depósitos recientes sin consolidar del Pleistoceno, que alojan al acuífero libre, el cual tiene un espesor promedio de 19 metros. En una franja que va del noreste al suroeste desde la Bahía del Espíritu Santo hasta los límites con Belice, en Quintana Roo, el acuífero está conformado por rocas calizas de color blanco del Mioceno pertenecientes a la formación Estero Franco, con finas láminas de yeso llamadas localmente “sascab”, el espesor medio del acuífero en esta región es de 50 metros.

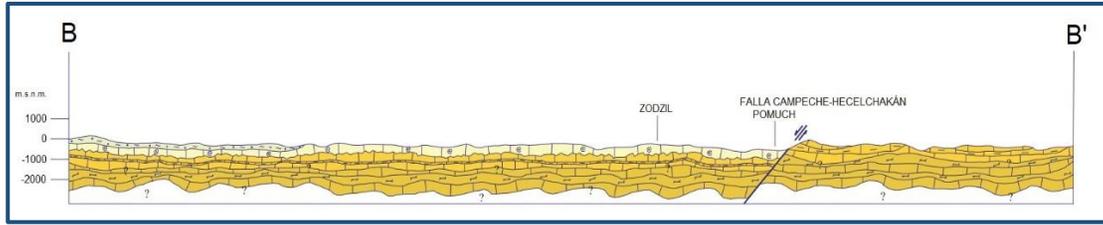
La región sureste del estado de Yucatán en las inmediaciones de la Reserva Estatal Biocultural del Puuc, conformada por rocas del Eoceno de alta permeabilidad correspondientes a la formación Chichen Itzá, presenta un espesor medio de 175 metros, el mayor espesor del acuífero.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas calizas, en las zonas costeras del acuífero el agua sobreyace el agua salada de origen marino, formando una zona de mezcla; la profundidad del agua marina y la zona de interfase responden directamente a la cercanía con la costa y el espesor de agua dulce disponible, y el basamento geohidrológico está representado por rocas cristalinas correspondientes a un pórfido riolítico intrusionado en un esquistos de cuarzo y clorita (figura 3).

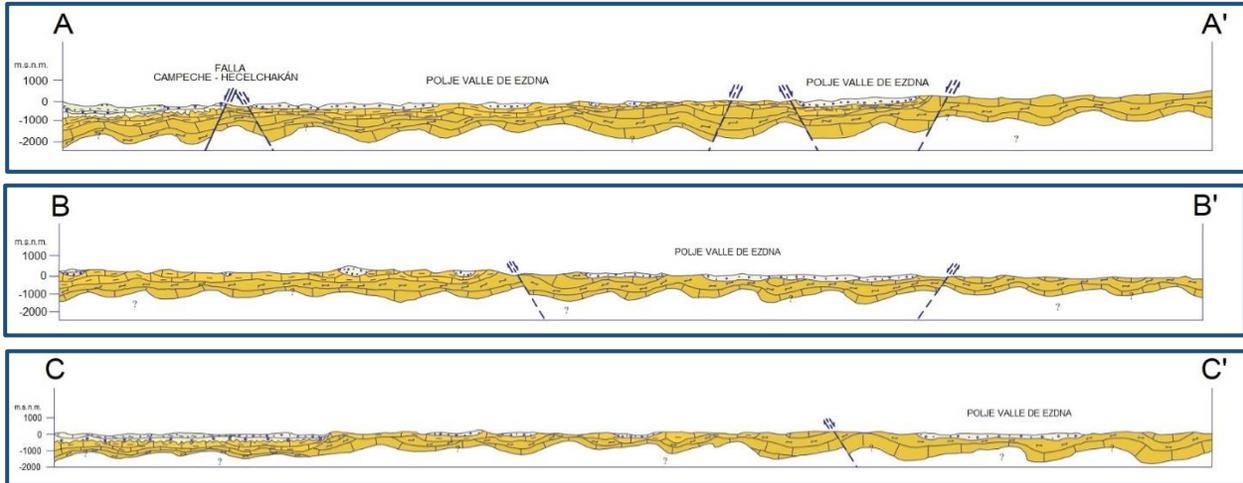


Fuente: Carta Geológica-Minera E16-4-7 Chetumal. Esc. 1:250.000 (SGM, 2005)

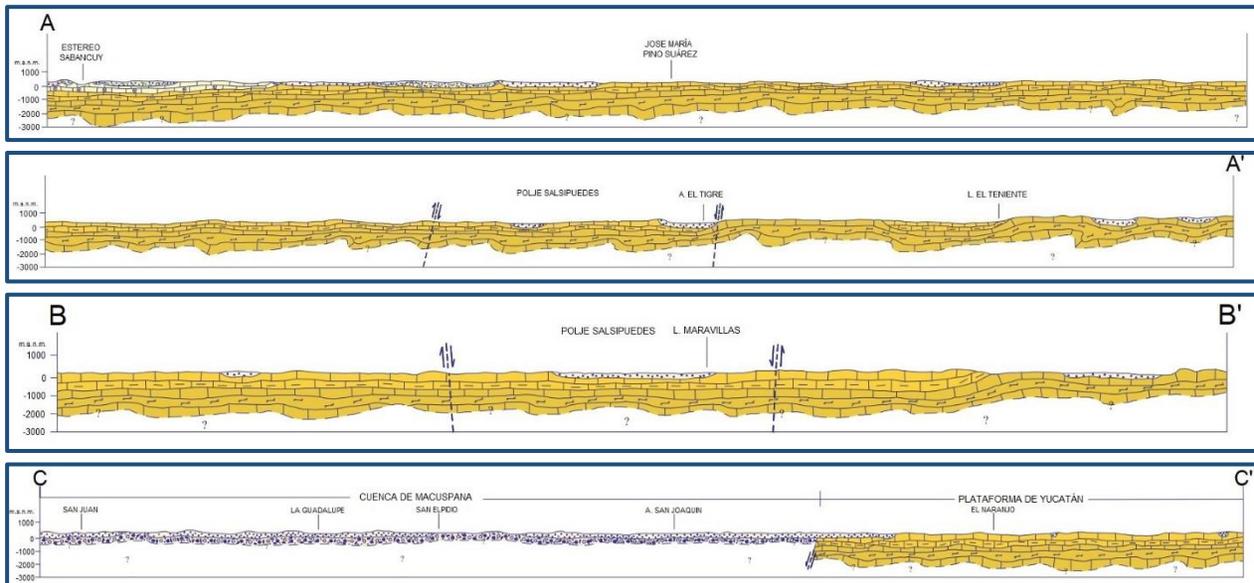




Fuente: Carta Geológica-Minera F15-9-12 Calkiní. Esc. 1:250.000 (SGM, 2005)



Fuente: Carta Geológica-Minera E15-3 Campeche. Esc. 1:250.000 (SGM, 2005)



Fuente: Carta Geológica-Minera E15-6 Ciudad del Carmen. Esc. 1:250.000 (SGM, 2005)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, se

encuentra constituido por calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, cuyo espesor va desde decenas de metros en las zonas costeras a cientos de metros al interior del continente. En la zona costera del estado de Yucatán se comporta como semiconfinado, ya que la capa de caliche que lo sobreyace funciona como una capa semiconfinante.

5.2 Parámetros hidráulicos

A partir de la revisión bibliográfica de estudios, artículos y tesis, se obtuvieron los resultados de algunas pruebas de bombeo. Los resultados de la interpretación de las pruebas indican que los valores medios de transmisividad varían de **1.3×10^{-2} a $5.6 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ (1194.4 a 48600 m^2/d)**, considerando valores de conductividad hidráulica de **8.9×10^{-5} a $6.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ (7.6 a 5400 m/d)**, y un espesor saturado variable de unidades a centenas de metros. Ninguna prueba de bombeo tomada de la revisión bibliográfica contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, a partir de la revisión bibliográfica, para fines del balance se adoptó un valor de **0.04**.

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 y mejor información piezométrica, para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2013-2019.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en el año 2019 muestra valores que variaban de 2 a 100 m. Las menores profundidades, de 2 a 5 m, se registraron en la costa del acuífero Península de Yucatán. Los niveles más profundos, de 40 a 100 m, se presentan entre las localidades de San Francisco Suc Tuc y Hopelchén (figura 4).

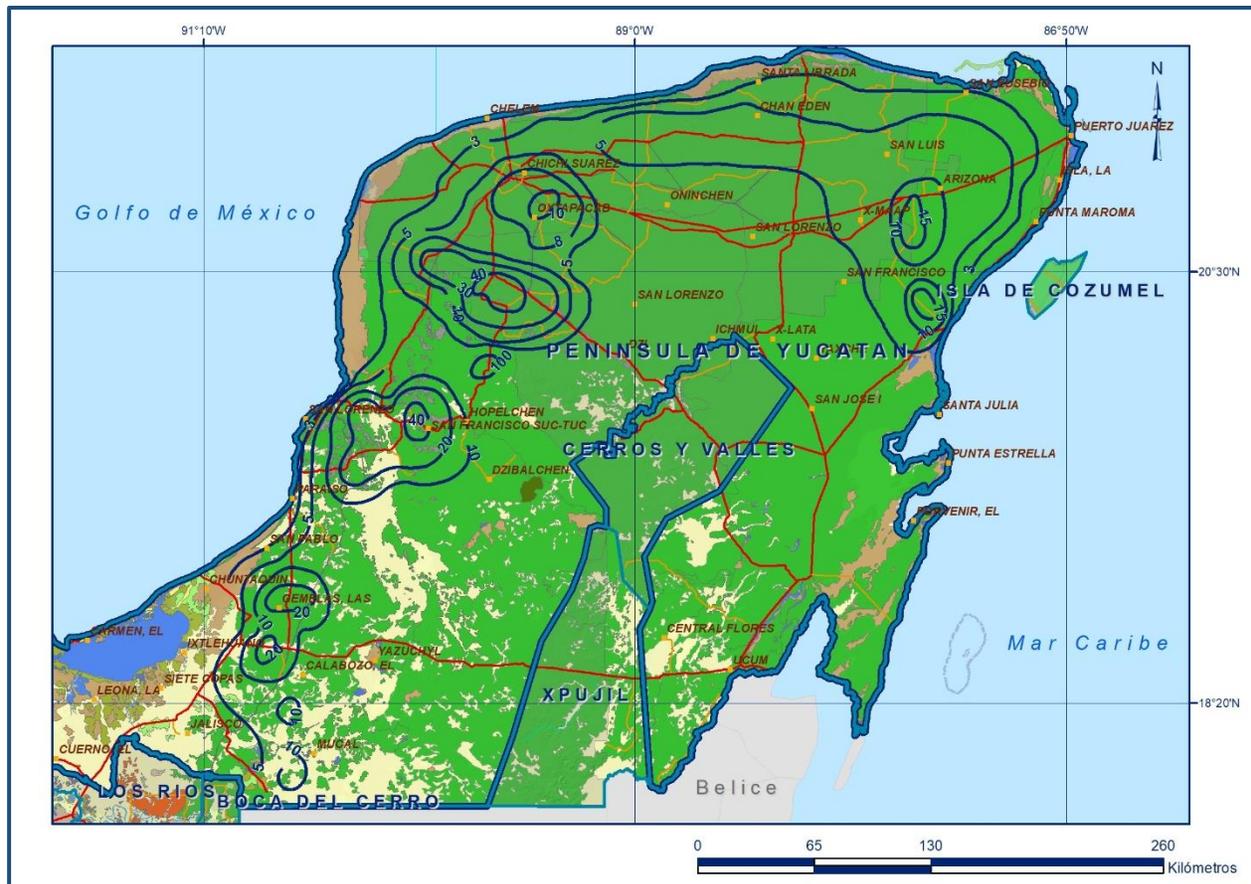


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 varió de 1 a 160 msnm, los valores mínimos, de 1 a 10 msnm, se registraron en la línea de costa del acuífero; en tanto que los valores máximos, 120 a 160 msnm, se registraron en la porción este de la localidad de Dzibalchen. De esta manera, se muestra una dirección preferencial del flujo subterráneo de las porciones internas del acuífero en sentido radial hacia la costa (figura 5).

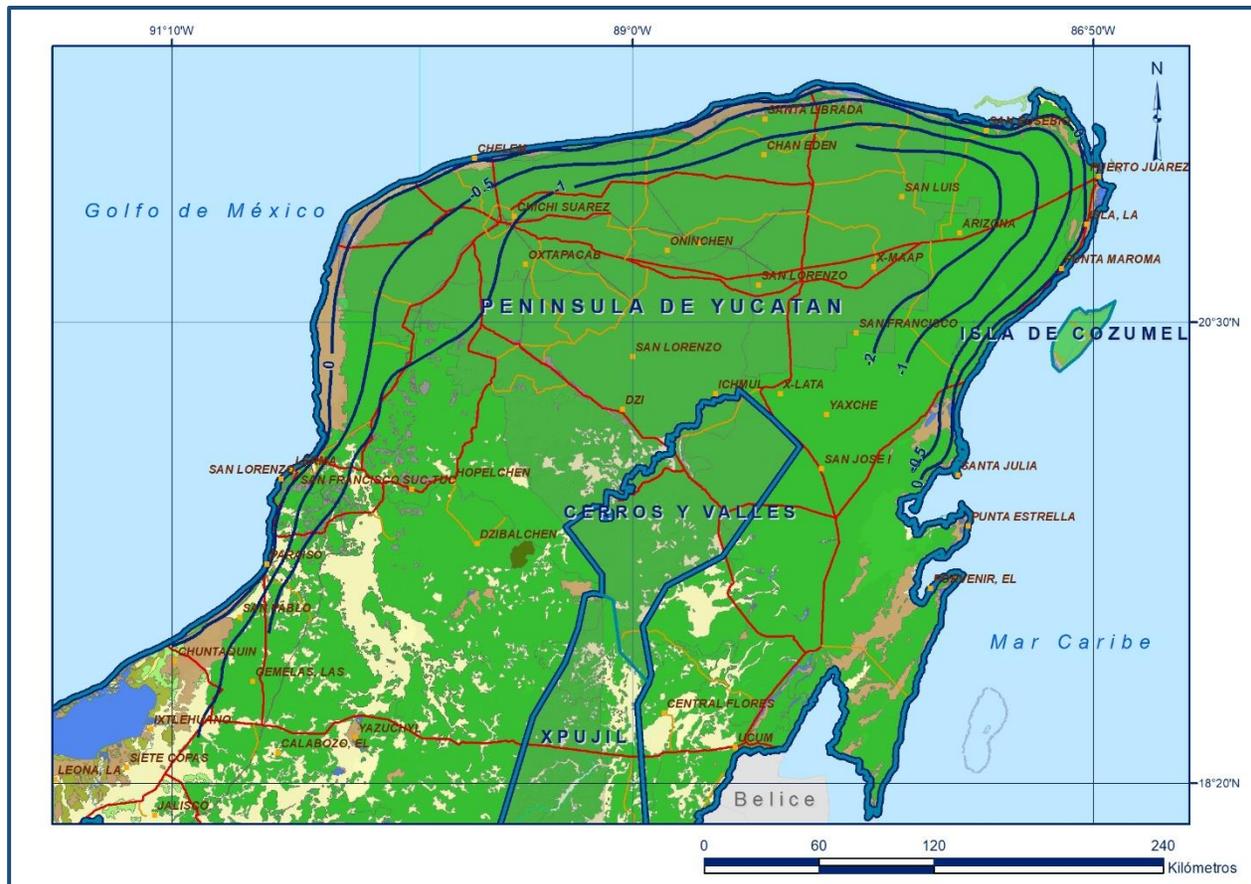


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2013-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Se consideraron 24 sitios de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA), de los cuales 23 son pozos y un cenote, los datos corresponden al periodo de 2012 a 2022. La información histórica de salinidad del agua subterránea, revela que la concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) presenta valores extremos de 482 a 2097 mg/l, cuyo valor máximo corresponde a calidad del agua clasificada como salobre. En la mayoría de los aprovechamientos se presentan concentraciones que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l de STD establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, para el agua destinada al consumo humano. En cuanto a la conductividad eléctrica, se registraron valores que varían de 789 a 3398 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores más altos se encuentran en tres aprovechamientos localizados al noroeste del acuífero, en el límite de los estados de Yucatán y Campeche.

De acuerdo con información del INEGI del año 2014, con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, predominan las familias de agua cálcica sódica-bicarbonatada clorurada y mixta-bicarbonatada clorurada en

las regiones de Mérida, Valladolid, Cancún y Tulum; mientras que en la región de Campeche predominan la familia cálcica sódica-mixta, cálcica-bicarbonatada y cálcica-sulfatada bicarbonatada. La presencia de calcio, magnesio y sodio reflejan la disolución de minerales de rocas carbonatadas, además de los procesos de intercambio iónico, la presencia de materiales arcillosos someros y los procesos de mezcla de agua dulce y marina.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua subterránea de la región presenta con mayor frecuencia contenidos altos de sales y concentraciones bajas de sodio (C3S1), sin embargo, también se presenta contenido medio a muy alto de sales y concentración baja a media de sodio (C2S1) y (C4S2).

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 **4,982.8 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022. De los cuales 1,911.6 hm³ (38.4 %) se destinan al uso agrícola, 0.2 hm³ para uso agroindustrial, 0.4 hm³ para uso doméstico, 18.4 hm³ (0.4%) para acuacultura, 652.5 hm³ (13.1 %) para servicios, 90.7 hm³ (1.8 %) para uso industrial, 34.6 hm³ (0.7 %) para uso pecuario, 650.3 hm³ (13 %) para uso público urbano, 1,622.3 hm³ (32.6 %) para diferentes usos, y 1.8 hm³ para generación de energía eléctrica.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2013-2019, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial, en una superficie de **52,529 km²** que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera incidental, 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 la red de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv** = Recarga vertical
- Eh** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri** = Recarga incidental
- B** = Bombeo
- ETR** = Evapotranspiración
- Sh** = Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm** = Descarga a través de manantiales
- Dfb** = Descarga a través de flujo base
- $\Delta V(S)$** = Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, 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.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

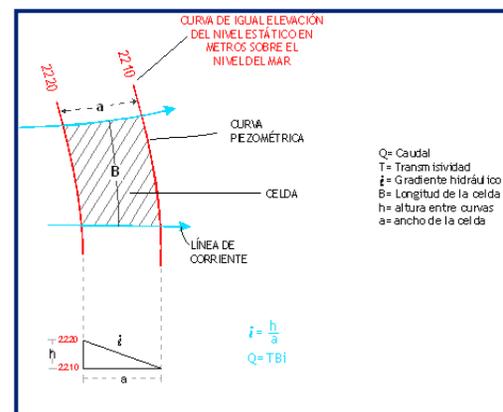
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

I = Gradiente hidráulico



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **1654.5 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

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

| CELDA | 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 | 41586 | 10593 | 2 | 0.00019 | 0.2398 | 1.8828 | 59.4 |
| E2 | 40961 | 9489 | 2 | 0.00021 | 0.2398 | 2.0703 | 65.3 |
| E3 | 27978 | 11091 | 2 | 0.00018 | 0.2398 | 1.2099 | 38.2 |
| E4 | 38024 | 7462 | 2 | 0.00027 | 0.2398 | 2.4438 | 77.1 |
| E5 | 29208 | 6712 | 2 | 0.00030 | 0.2398 | 2.0872 | 65.8 |
| E6 | 13880 | 20379 | 2 | 0.00010 | 0.2398 | 0.3267 | 10.3 |
| E7 | 47518 | 17362 | 2 | 0.00012 | 0.2398 | 1.3126 | 41.4 |
| E8 | 37069 | 13080 | 2 | 0.00015 | 0.2398 | 1.3592 | 42.9 |
| E9 | 35063 | 14963 | 2 | 0.00013 | 0.0138 | 0.0648 | 2.0 |
| E10 | 26778 | 14544 | 10 | 0.00069 | 0.2398 | 4.4152 | 139.2 |
| E11 | 45578 | 5863 | 10 | 0.00171 | 0.2398 | 18.6408 | 587.9 |
| E12 | 36708 | 7903 | 5 | 0.00063 | 0.2398 | 5.5690 | 175.6 |
| E13 | 27467 | 11086 | 5 | 0.00045 | 0.2398 | 2.9707 | 93.7 |
| E14 | 31820 | 22745 | 5 | 0.00022 | 0.2398 | 1.6774 | 52.9 |
| E15 | 30296 | 11442 | 20 | 0.00175 | 0.0138 | 0.7321 | 23.1 |
| E16 | 73502 | 38578 | 5 | 0.00013 | 0.2398 | 2.2844 | 72.0 |
| E17 | 31852 | 11360 | 2 | 0.00018 | 0.2398 | 1.3447 | 42.4 |
| E18 | 29294 | 13372 | 2 | 0.00015 | 0.2398 | 1.0507 | 33.1 |
| E19 | 29378 | 13811 | 2 | 0.00014 | 0.2398 | 1.0202 | 32.2 |
| TOTAL | | | | | | | 1654.5 |

7.1.3 Recarga incidental (Ri)

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

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró un coeficiente de infiltración. El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 1911.6 hm^3 anuales. Si consideramos que el 30% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, obtenemos un volumen de 573.5 $hm^3/año$ de recarga por retornos de riego.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y de alcantarillado es del orden del 20 al 45 %. Para este caso se consideró que el 30% del volumen destinado al uso público urbano (650.3 hm^3 anuales) se infiltra

como recarga efectiva al acuífero. Es decir que la recarga inducida de esta manera es de 195.1 hm³ anuales. Por lo tanto, el volumen total por recarga incidental **Ri= 768.6 hm³/año**.

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por bombeo (B), evapotranspiración (ETR), salidas subterráneas horizontales hacia el mar (Sh), descarga a través de manantiales (Dm) y descarga a través de flujo base (Dfb).

7.2.1 Bombeo (B)

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se tiene registrado un volumen de extracción de **4982.8 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 31 de diciembre del 2022.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

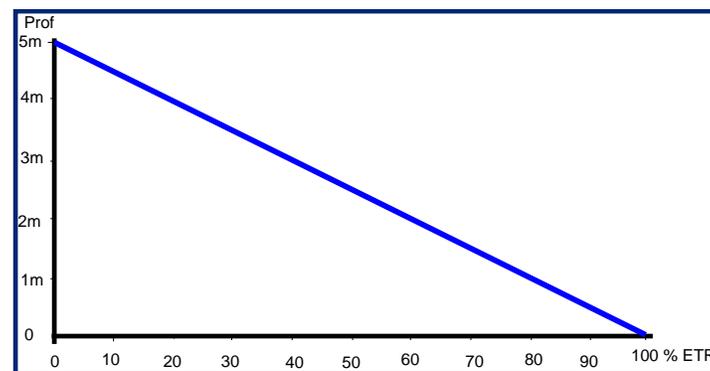
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando el valor promedio anual de temperatura (26.2 °C) y precipitación (1128 mm) obtenidos de las 50 estaciones climatológicas que tienen influencia dentro del área del acuífero, la lámina de ETR obtenida es de 1000.9 mm anuales.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

| | | | |
|----------|--------|------------------|------------|
| T (°C) = | 26.2 | | |
| P(mm) = | 1128 | P ² = | 1272384 |
| L = | 1854.2 | L ² = | 3438192.62 |
| ETR (mm) | 1000.9 | | |

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el

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



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área entre curvas de diferente profundidad al nivel estático 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 = 6567.2 hm³/año**.

Tabla 4. Calculo de la evapotranspiración real

| RANGOS DE PROFUNDIDAD (m) | PROFUNDIDAD MEDIA (m) | ÁREA (km ²) | LÁMINA ETR (m) | PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR | % ETR | VOLUMEN ETR (hm ³ /año) |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|---|-------|------------------------------------|
| 0 a 3 | 1.5 | 7344.9 | 1.0009 | 5 | 0.7 | 5146.1 |
| 3 a 5 | 4 | 7099.2 | 1.0009 | 5 | 0.2 | 1421.1 |
| TOTAL | | 14444.033 | | | | 6567.2 |

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019 (figura 5); su valor estimado es de **1585.5 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

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

| CELDA | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | h_2-h_1 (m) | GRADIENT E i | T (m^2/s) | CAUDAL Q (m^3/s) | VOLUMEN ($hm^3/año$) |
|--------------|----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|------------------------|
| S1 | 38469 | 8143 | 1 | 0.00012 | 0.5625 | 2.6573 | 83.8 |
| S2 | 40469 | 6526 | 1 | 0.00015 | 0.5625 | 3.4880 | 110.0 |
| S3 | 42173 | 3444 | 1 | 0.00029 | 0.5625 | 6.8884 | 217.2 |
| S4 | 35973 | 5574 | 1 | 0.00018 | 0.5625 | 3.6304 | 114.5 |
| S5 | 32468 | 5249 | 1 | 0.00019 | 0.1482 | 0.9166 | 28.9 |
| S6 | 24836 | 9253 | 1 | 0.00011 | 0.1482 | 0.3978 | 12.5 |
| S7 | 47468 | 8513 | 1 | 0.00012 | 0.1482 | 0.8264 | 26.1 |
| S8 | 50446 | 10447 | 1 | 0.00010 | 0.1482 | 0.7156 | 22.6 |
| S9 | 37222 | 9590 | 1 | 0.00010 | 0.1482 | 0.5752 | 18.1 |
| S10 | 34388 | 6707 | 1 | 0.00015 | 0.1425 | 0.7306 | 23.0 |
| S11 | 39554 | 5612 | 1 | 0.00018 | 0.1425 | 1.0043 | 31.7 |
| S12 | 40063 | 5057 | 1 | 0.00020 | 0.1425 | 1.1288 | 35.6 |
| S13 | 27350 | 6695 | 1 | 0.00015 | 0.1425 | 0.5822 | 18.4 |
| S14 | 35224 | 6108 | 1 | 0.00016 | 0.1425 | 0.8217 | 25.9 |
| S15 | 58097 | 12990 | 1 | 0.00008 | 0.1425 | 0.6373 | 20.1 |
| S16 | 37708 | 7287 | 1 | 0.00014 | 0.1425 | 0.7374 | 23.3 |
| S17 | 34832 | 6149 | 1 | 0.00016 | 0.2398 | 1.3585 | 42.8 |
| S18 | 31907 | 2944 | 1 | 0.00034 | 0.2398 | 2.5987 | 82.0 |
| S19 | 30460 | 4115 | 1 | 0.00024 | 0.2398 | 1.7752 | 56.0 |
| S20 | 33174 | 3910 | 1 | 0.00026 | 0.2398 | 2.0345 | 64.2 |
| S21 | 39188 | 6701 | 1 | 0.00015 | 0.2398 | 1.4024 | 44.2 |
| S22 | 31088 | 16762 | 1 | 0.00006 | 0.5625 | 1.0433 | 32.9 |
| S23 | 37310 | 24292 | 1 | 0.00004 | 0.5625 | 0.8640 | 27.2 |
| S24 | 45867 | 12476 | 1 | 0.00008 | 0.5625 | 2.0680 | 65.2 |
| S25 | 32148 | 5619 | 1 | 0.00018 | 0.5625 | 3.2184 | 101.5 |
| S26 | 34897 | 4646 | 1 | 0.00022 | 0.5625 | 4.2247 | 133.2 |
| S27 | 26447 | 7142 | 1 | 0.00014 | 0.5625 | 2.0829 | 65.7 |
| S28 | 24745 | 7453 | 1 | 0.00013 | 0.5625 | 1.8676 | 58.9 |
| TOTAL | | | | | | | 1585.5 |

7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con información del 2023, se identificó la existencia de seis manantiales, dos de ellos ubicados en el estado de Campeche y los otros cuatro dentro del estado de Quintana Roo, en conjunto descargan **0.01 hm³ anuales**.

7.2.5 Descarga a través de flujo base (Dfb)

De acuerdo con los registros de aforos realizados en tres estaciones hidrométricas; “Candelaria” para el periodo 1995-2014, localizada a la salida de la cuenca Alto Río Candelaria, sobre el río Candelaria, el caudal base es de 12.8 m³/s, que representan un volumen medio anual de 403.5 hm³ anuales; “Palizada” para el periodo 1995-2014, localizada en a la salida de la cuenca Usumacinta, sobre el río Usumacinta, el caudal base es de 48.7 m³/s, que representan un volumen medio anual de 1536 hm³ anuales;

y “Mamantel” para el periodo 1995-2014, localizada en la parte baja de la cuenca Mamantel, sobre el río Mamantel, el caudal base es de 0.09 m³/s, que representan un volumen medio anual de 2.8 hm³ anuales; en conjunto el volumen de descarga es **1942.3 hm³ anuales**.

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 2013-2019 (figura 6). Con base en ella y valores de coeficiente de almacenamiento variable de 0.04 a 0.16, 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 entre curvas de igual evolución del nivel estático

H : Valor medio de la variación piezométrica en el período

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2013-2019 se pueden observar en la tabla 4. El volumen anual del cambio de almacenamiento es de **-146.0 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2013-2019)

| Evolución (m) | Evolución media (m) | Área (km ²) | Sy | $\Delta V(S)$ (hm ³ /año) |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|--------------|--------------------------------------|
| -1 a -2 | -1.5 | 3019.9 | 0.04 | -181.2 |
| -0.5 a -1 | -0.8 | 11842.6 | 0.04 | -355.3 |
| 0 a -0.5 | -0.25 | 8481.0 | 0.16 | -339.2 |
| | TOTAL | 23343.6 | TOTAL | -875.7 |
| PROMEDIO ANUAL | | | | -146.0 |

Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= B + ETR + Sh + D_m + D_{fb} \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 4982.8 + 6567.2 + 1585.5 + 0.01 + 1942.3 - 146.0 - 1654.5 - 768.6 \\ R_v &= 12508.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 12508.7 + 1654.5 + 768.6 \\ R &= 14931.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **14931.8 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas

que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Península de Yucatán su valor es de **7686.8 hm³ anuales**, de los cuales 1585.5 hm³ anuales corresponde a las salidas subterráneas que aún presenta el acuífero para impedir el avance de la intrusión marina, 4159 hm³ anuales al 63.3% de la evapotranspiración, que se debe comprometer para preservar el ecosistema costero de las lagunas, esteros, zonas naturales protegidas y sitios RAMSAR, 1942.3 hm³ anuales que corresponde a la descarga del flujo base de los ríos Candelaria, Usumacinta y Mamantel, y 0.01 hm³ a la descarga de los manantiales. Por lo tanto, **DNC = 7686.8 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **5,185,365,077 m³ 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 14931.8 - 7686.8 - 5185.365077 \\ \text{DMA} &= 2059.634923 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **2,059,634,923 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2016. Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2002. Estudio hidrológico del estado de Yucatán. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2002. Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo. México.

Bautista, F. y Palacio, G. 2011. Parte III. Regionalización edáfica del territorio de México. Capítulo 24. Península de Yucatán. Geografía de suelos de México. Universidad Nacional Autónoma de México.

García, E. 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2005. Carta Geológico-Minera E15-6 "Ciudad del Carmen", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2006. Carta Geológico-Minera E16-2-5 "Bahía Ascensión", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2005. Carta Geológico-Minera F15-9-12 "Calkiní", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2005. Carta Geológico-Minera E15-3 "Campeche", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2006. Carta Geológico-Minera F16-8 "Cancún", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2005. Carta Geológico-Minera E16-4-7 "Chetumal", escala 1:250,000.

Villanueva, M. e Iglesias, A. (1984). Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Editorial IGME. Madrid, España.

Marín, L., Perry, E., Essaid, H. y Steinich B. 2001. Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico. Primera Conferencia Internacional sobre Intrusión de Agua Salada y Acuíferos Costeros—Monitoreo, Modelado y Gestión. Essaouira, Marruecos.

Comisión Nacional del Agua y Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología e hidráulica Costera, I. C. 2009. Implementación de red piezométrica en la zona poniente del estado de Yucatán, Ubicada en los municipios de Umán, Ucu, Mérida, Progreso y Conkal, Yuc.

Villasuso, M., Sáñchez, I., Anul, C., Casares, R., Baldazo, G., Souza, J. Poot, P. y Pech C. 2011. Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan state, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13 (2011): 243- 260.

Rivera, K. 2013. Tesis: Estudio geofísico e hidrogeológico para un banco de materiales, en Playa del Carmen Quintana Roo, México. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL). 1990. Geología de la República Mexicana. México.

Sánchez, J., Álvarez, T., Pacheco, J., González, R. y Carrillo L. 2015. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Volumen 32, núm. 1, 2015, p. 62-76.