CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO MARQUÉS DE COMILLAS (0713), ESTADO DE CHIAPAS

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1. Localización 2
1.2. Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 4
3. FISIOGRAFÍA 4
3.1. Provincia fisiográfica 4
3.2. Clima 5
3.3. Hidrografía 5
3.4. Geomorfología 6
4. GEOLOGÍA 6
4.1. Estratigrafía 8
4.2. Geología estructural 10
4.3. Geología del subsuelo 11
5. HIDROGEOLOGÍA 11
5.1. Tipo de acuífero 11
5.2. Parámetros hidráulicos 12
5.3. Piezometría 12
5.4. Comportamiento hidráulico 12
5.4.1 Profundidad al nivel estático 12
5.4.2 Elevación del nivel estático 13
5.4.3 Evolución del nivel estático 14
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 15
7.1. Entradas 16
7.1.1 Recarga vertical 16
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 17
7.2. Salidas 18
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal 18
7.2.2 Evapotranspiración (ETR) 19
7.2.3 Bombeo (B) 20
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS) 20
8. DISPONIBILIDAD 21
8.1. Recarga total media anual (R) 22
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 22
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 22
8.4. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA) 23
9. BIBLIOGRAFÍA 24

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 Marqués de Comillas, definido con la clave 0713 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo oriental del estado de Chiapas, en el límite con la República de Guatemala, entre los paralelos 16°04' a 16°36' de latitud Norte y los meridianos 90°22' a 90°57´ de longitud Oeste, cubre una superficie aproximada de 2,012 km^2 (Figura 1).

Figura 1. Localización del acuífero Marqués de Comillas

Limita al oeste con el acuífero Ocosingo, que pertenece al estado de Chiapas, el resto de su límite colinda con Guatemala, en sus extremos norte y occidental a través del río Salinas Chixoy.

Geopolíticamente se localiza en su totalidad en los municipios de Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas. 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 0713 MARQUES DE COMILLAS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	90	39	21.3	16	35	31.8	DEL 1AL 2POR EL LIMITE INTERNACIONAL
2	90	57	24.5	16	4	24.7	DEL 2AL 1POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	90	39	21.3	16	35	31.8	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Marqués de Comillas pertenece al Organismo de Cuenca "Frontera Sur". En la superficie completa que comprende el acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El principal uso es el doméstico. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No se han realizado estudios geohidrológicos de evaluación en el territorio que comprende el acuífero, el único que abarca su superficie es el estudio denominado: **ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LOS ACUÍFEROS OCOSINGO Y MARQUÉS DE COMILLAS, EN EL ESTADO DE CHIAPAS, elaborado por la empresa ISO Desarrollo e Ingeniería, S.A. DE C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010.** El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierras de Chiapas y Guatemala.

Esta provincia se constituye de una estrecha planicie costera con un gran número de lagunas litorales, al norte de la cual se levanta una sierra abrupta en la que sobresalen los picos del volcán Tacaná y del volcán Tajumulco en la frontera misma con Guatemala que forma la Sierra de Chiapas.

Siguiendo en la misma dirección, encontramos una cuenca alargada formada por el río Grijalva que se ha denominado Depresión Central; más al norte el terreno vuelve a subir para formar una amplia meseta en donde son notables los profundos cañones como el del Sumidero, labrados en rocas calcáreas y finalmente hacia el límite norte de la provincia se encuentra la zona de Sierras Plegadas y cortadas profundamente que forman un manojo de montañas interrumpidas por valles muy estrechos.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el territorio que cubre el acuífero es dominado por un solo tipo de clima, el cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, este tipo de clima prevalece hacia el norte de Palenque hacia los límites con los estados de Tabasco, también se encuentra este tipo de clima en la región de la selva lacandona.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 3 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Agua Azul, El Cedro e Ixcán, cuyo registro comprende un periodo de 30 años.

Con los datos existentes y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **2,473.7 mm** y **25.4 °C** respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2055.5 mm anuales.**

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias que abarca de febrero a abril, con precipitaciones menos significativas. En el mes de septiembre se tiene la mayor lámina de precipitación con 390.3 mm; mientras que en el mes de abril solo se registra una lámina de precipitación de 55.2 mm.

En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido, con una temperatura media de 34.5°C, en tanto que los meses de enero y febrero registran la menor temperatura media, 17.5°C, para ambos.

3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero pertenece a la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta, Cuencas de los ríos Lacantun y Chixoy. El estado de Chiapas representa la entidad con mayor potencial de recursos hidrológicos del país (INEGI, 1995), localizándose algunos de los ríos más caudalosos.

Así mismo, las centrales hidroeléctricas Belisario Domínguez (La Angostura), Nezahualcóyotl (Malpaso) y Manuel Moreno Torres (Chicoasén) ocupan los primeros lugares a nivel nacional en capacidad total de almacenamiento y generación de energía eléctrica.

La hidrografía de la entidad es abundante, se divide en dos vertientes separadas por la Sierra Madre: la vertiente del Pacífico, con cursos de agua cortos, que se caracterizan por crecidas anuales; y la vertiente del Atlántico, drenada por ríos de régimen regular.Las principales corrientes superficiales están constituidas por los ríos Grijalva, Usumacinta (en parte de su trayecto se establece la frontera con la República de Guatemala), Jataté y Suchiate (parte de su caudal marca el límite internacional con la república de Guatemala).

3.4. Geomorfología

La morfología de la zona está determinada por dos grandes cadenas montañosas: la Sierra Madre de Chiapas y la Altiplanicie Central, que la recorren con orientación Noroeste-Sureste. La primera de ellas corre casi paralela a la costa del Pacífico con altitudes promedio de 1,000 msnm en los límites con Oaxaca y hasta más de 2.000 msnm en la frontera con Guatemala.

La otra cadena montañosa también conocida como Altos de Chiapas), se desplaza por la parte central del estado. Proviene de Guatemala y desde ahí penetra en territorio mexicano, alcanzando sus máximas altitudes cerca de San Cristóbal de las Casas.

4. GEOLOGÍA

A nivel regional, la sedimentación en la cuenca Paleozoica de Chiapas, formaciones Grupera y Paso Hondo, acontece durante el Pérmico y fueron deformadas en el Pérmico-Triásico durante la Orogenia Apalachiana producida por la colisión de Godwana con Báltica y Laurentia para conformar el supercontinente Pangea a finales del Paleozoico; simultáneamente se desarrolla un cinturón de plutones graníticos que corresponden al Macizo de Chiapas (Zaldívar R.J. *et al.*, 1984) (Figura 2).

Durante el Triásico-Jurásico ocurrió el rompimiento de Pangea, separándose las placas de África, Sudáfrica y Norteamérica, dando resultado la apertura del Atlántico y el Golfo de México.

Los efectos tensionales provocaron la fragmentación del basamento y generaron fosas y pilares que fueron rellenadas por capas rojas (Formación Todos Santos).

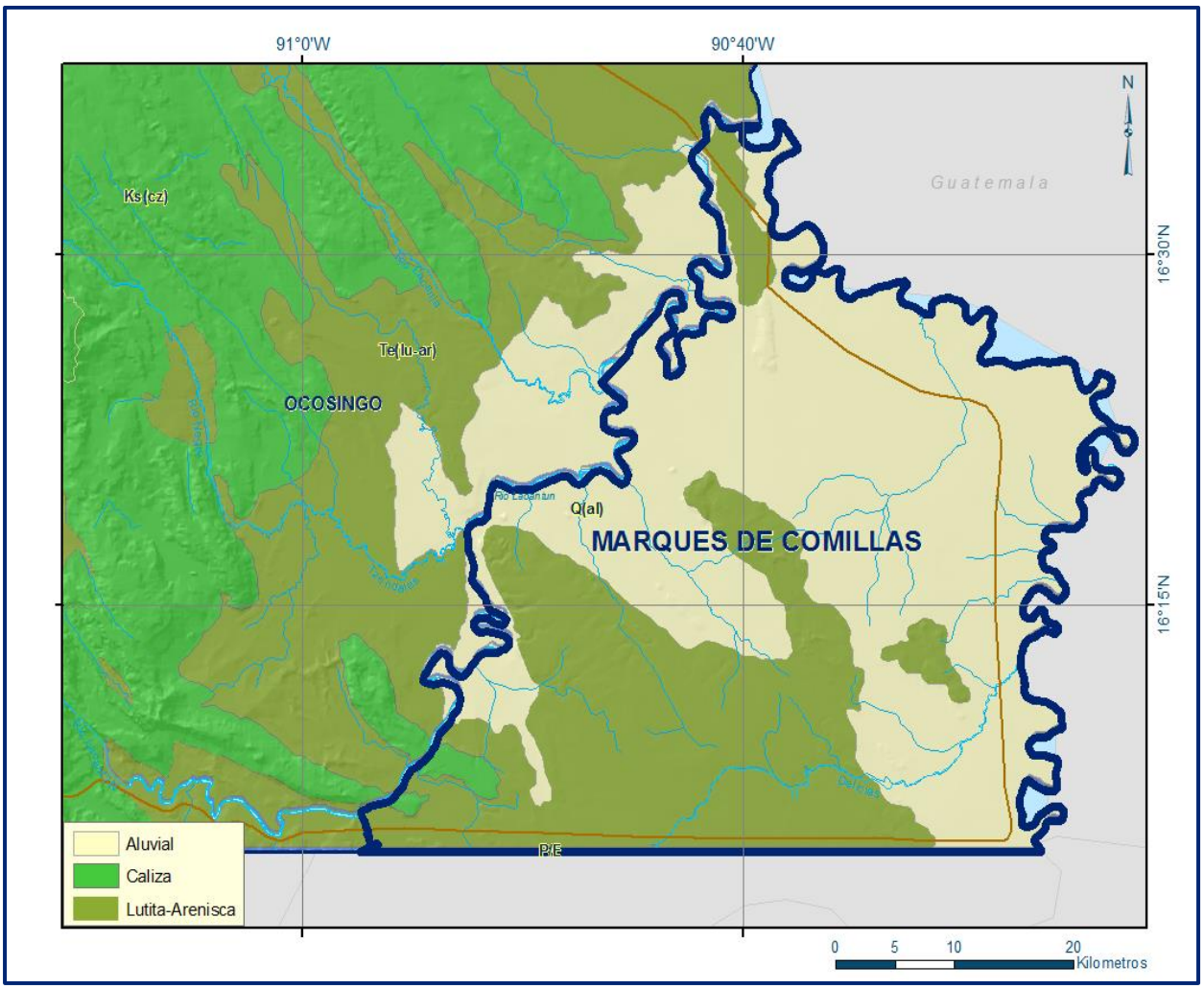


Figura 2. Geología general del acuífero

El hundimiento progresivo dio lugar a la invasión marina (transgresión) lo que permitió el desarrollo de la cuenca Sierra de Chiapas con el depósito de las formaciones San Ricardo y Chinameca durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Caballero H.G. *et al*., 1991); a partir del Altiplano y hasta el Santoniano la transgresión se vuelve más intensa, depositándose una gruesa secuencia de carbonatos de plataforma interna de la Formación Sierra Madre, continuando hasta el Campaniano-Mastrichtiano con el depósito de las formaciones Ocozocuautla y Angostura.

A finales del Cretácico Superior la Orogenia Laramide provocó la exposición de las rocas preexistentes, iniciando su erosión y el depósito de clásticos en la porción occidental de la Sierra de Chiapas, mientras que la parte oriental de la cuenca permaneció estable.

Durante el Paleoceno ocurre el levantamiento y hundimiento de bloques que da lugar al depósito de carbonatos de plataforma de la Formación Tenejapa-Lacandón y clásticos de la Formación Soyaló.

Durante el Eoceno se registra un incremento en el levantamiento del Macizo de Chiapas acompañado por una subsidencia lenta y erosión del Macizo que permitió el depósito de terrígenos continentales de la Formación El Bosque; simultáneamente ocurre el depósito de sedimentos arcillo-calcáreos de la Formación Lomut.

En el Oligoceno Inferior los bloques se basculan ocasionando un levantamiento que generó un hiatus en algunas regiones, en el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano existió un periodo de subsidencia que derivó en el depósito de terrígenos y carbonatos de las formaciones Simojovel y Tulijá en la porción norte.

A finales del Mioceno todas las secuencias sedimentarias mencionadas se deformaron como consecuencia del evento Chiapaneco, perteneciente a la Orogenia Cascadiana, producto del movimiento sinestral de las fallas Motagua y Polochic por la interacción de las placas de Norteamérica, Cocos y Caribe, dando lugar a eventos transgresivos que dieron lugar al plegamiento del plano axial de las estructuras laramídicas. En el Mioceno Medio-Superior ocurre el vulcanismo félsico relacionado con el magmatismo de la Sierra Madre del Sur, representado por manifestaciones de toba riolítica.

En el Plioceno-Pleistoceno se registran depósitos continentales en cuencas muy locales (Carta Geológico-Minera E15-12-D15-3 “Las Margaritas”, escala 1:250000. SGM, 2006).

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero, está conformada por rocas sedimentarias cuyas edades que varían del Mesozoico al Reciente; las cuales conforman parte de la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur y en su totalidad a la Provincia Fisiográfica Sierras de Chiapas y Guatemala (figura 2). Sin embargo, aunque no afloran todas las unidades de la estratigrafía regional, a continuación, se describen de la más antigua a la más reciente:

Caliza-Lutita (Pérmico Inferior)

Unidad compuesta por una alternancia de calizas y lutitas de la Formación Grupera (290 Ma); debido al límite del sistema acuífero la unidad no aflora en el área.

Caliza-Dolomía (Pérmico Superior)

Esta unidad no aflora en la superficie cubierta por el acuífero; su edad varía entre 250 y 270 Ma y es correlacionable con la Formación Paso Hondo que pertenece a la Cuenca Paleozoica de Chiapas.

Limolita-Arenisca (Jurásico Medio)

Esta secuencia está conformada por limolitas-areniscas y conglomerado del Jurásico, correlacionable con la Formación Todos Santos (160 y 180 Ma). Con su depósito se inicia la sedimentación en la Cuenca Sierra de Chiapas. Al igual que las unidades anteriores, esta secuencia no afora en la superficie cubierta por el acuífero.

Caliza-Dolomía (Cretácico Inferior)

Esta secuencia es correlacionable con la Formación Sierra Madre del Aptiano-Santoniano. Aflora de forma aislada en todo el acuífero, abarcando el 11% de su superficie total.

Caliza-Lutita (Cretácico Superior)

Secuencia correlacionable con la Formación Ocozocuautla-Angostura, de edad Campaniano-Maastrichtiano. Aflora de forma aislada pero bien diferenciada en la porción norte del acuífero, cubriendo una superficie aproximada que equivale al 4% del área total.

Calizas (Terciario-Paleoceno)

Unidad compuesta de calizas de facies de talud y plataforma correlacionables con las formaciones Tenejapa-Lacandón; aflora de forma aislada en toda el área del acuífero, abarcando un 30% de su superficie total.

Lutita-Arenisca (Terciario-Paleoceno)

Depósitos de sedimentos de cuenca constituidos por lutitas, areniscas y calizas, correlacionables con la Formación Soyaló del Paleoceno, las cuales tiene un cambio lateral a facies de talud y plataforma de las formaciones Tenejapa-Lacandón. Esta unidad aflora en las porciones sur y sureste, abarcando una superficie aproximada del 6% del área total del acuífero.

Limolita-Arenisca (Terciario-Eoceno)

Sobre las formaciones antes descritas, se depositaron de manera concordante estos paquetes de limolitas y areniscas con intercalaciones de calizas, correlacionables con la Formación El Bosque.

Esta unidad litológica se encuentra aflorando de forma aislada en el acuífero, abarcando una superficie aproximada del 15%.

Caliza-Arenisca (Terciario-Eoceno)
Depósitos de la Formación Lomut del Eoceno que aparecen de forma concordante a la anterior, se le encuentra aflorando en la porción norte del acuífero, ocupando una superficie aproximada del 10%.

Arenisca-Conglomerado Polimíctico (Neógeno)
Depósitos que ocurren durante el Plioceno hasta el Pleistoceno. En el área del acuífero, la unidad abarca el 1% del total y aflora en la porción este del acuífero.

Conglomerado Oligomíctico (Cuaternario)
Unidad sedimentaría de edad reciente que se encuentra ocupando el 2% del área total del acuífero.

Aluvión (Cuaternario)
Unidad integrada por materiales granulares de granulometría variada: arcillas, limos y arenas, que se encuentran en los lechos de los ríos y arroyos. Aflora de manera aislada en pequeñas áreas y principalmente al este del acuífero, a lo largo del cauce del río Lacantun, en una superficie que representa el 5% del área total del acuífero.

4.2. Geología estructural

En la zona se identifican anticlinales y sinclinales, así como fallas normales y laterales, asociados a diferentes eventos de formación. Los planos axiales de los anticlinales y sinclinales tienen dirección NW-SE con flexiones que indican plegamiento. Entre estas estructuras se encuentran, Chajul, Tlaltizapán, Santa María, Marqués de Comillas y Delicias.

Las fallas normales tienen un rumbo NW-SE entre las que se encuentran las siguientes: Puerto Rico, Palestina, san Miguel, Tecoja, Santa Elena, Velasco Suárez, Lacanjá, Sierra Guiral, Jerusalén, Cojolita, Chiapas, Leyva Velázquez, Momón, Belisario Dominguez, Plan de Guadalupe, El Naranjo, La Bélgica, Guadalupe Miramar, La Colorada, La Colorada, La Juncana, Las Delicias, Livingstone y el Jocote.

Las fallas de desplazamiento lateral izquierdo tienen una dirección NE-SW y destacan La Estrella, Aquiles Serdán, San Juan del Pozo, La Laguna, Sierra Caribe, Sierra Caribe I, Sierra Caribe II; y de rumbo E-W, la Falla Flor de Café.

Las fallas de desplazamiento lateral derecho son las denominadas Acotadito, San Javier y Bambú con dirección NE-SW y Huixtán con orientación NW-SE.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Lacantun y arroyos intermontanos y en los conglomerados polimícticos. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad, las calizas de las formaciones El Bosque, Tejenapa-Lacandón, Ocozocuautla-Angostura y Sierra Madre, constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Este es un acuífero que aún no ha sido explorado.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias fracturadas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de limolitas y areniscas que conforman la Formación Todos Santos. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas formadas durante la revolución Laramídica.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias entre las que destacan las calizas, dolomías y calizas-lutitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución.

Las calizas de las formaciones El Bosque, Tejenapa-Lacandón, Ocozocuautla-Angostura y Sierra Madre, pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se realizaron 9 pruebas de bombeo de larga duración, en etapa de abatimiento y recuperación.

Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob, además para fines comparativos se complementó el análisis utilizando Hantush y Papadopulos, tanto en etapa de abatimiento como recuperación.

Los resultados de su interpretación indican que los valores medios de transmisividad varían entre **0.3 y 2.0 m^2/s**, con un valor promedio de **1.3 x 10^{-3} m^2/s**.

Los valores de conductividad hidráulica varían de **2.9 x10^{-6} a 1.16 x10^{-5} m/s** (0.2 y 1.0 m/día), que se asocian a sedimentos de granulometría fina. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 3, muestra que los valores varían desde 2 m, que se registran en la zona cercana al cauce de los ríos Lacantun y Chixoy, hasta los 10 m, conforme se asciende topográficamente. Las mayores profundidades se presentan al centro del área del acuífero.

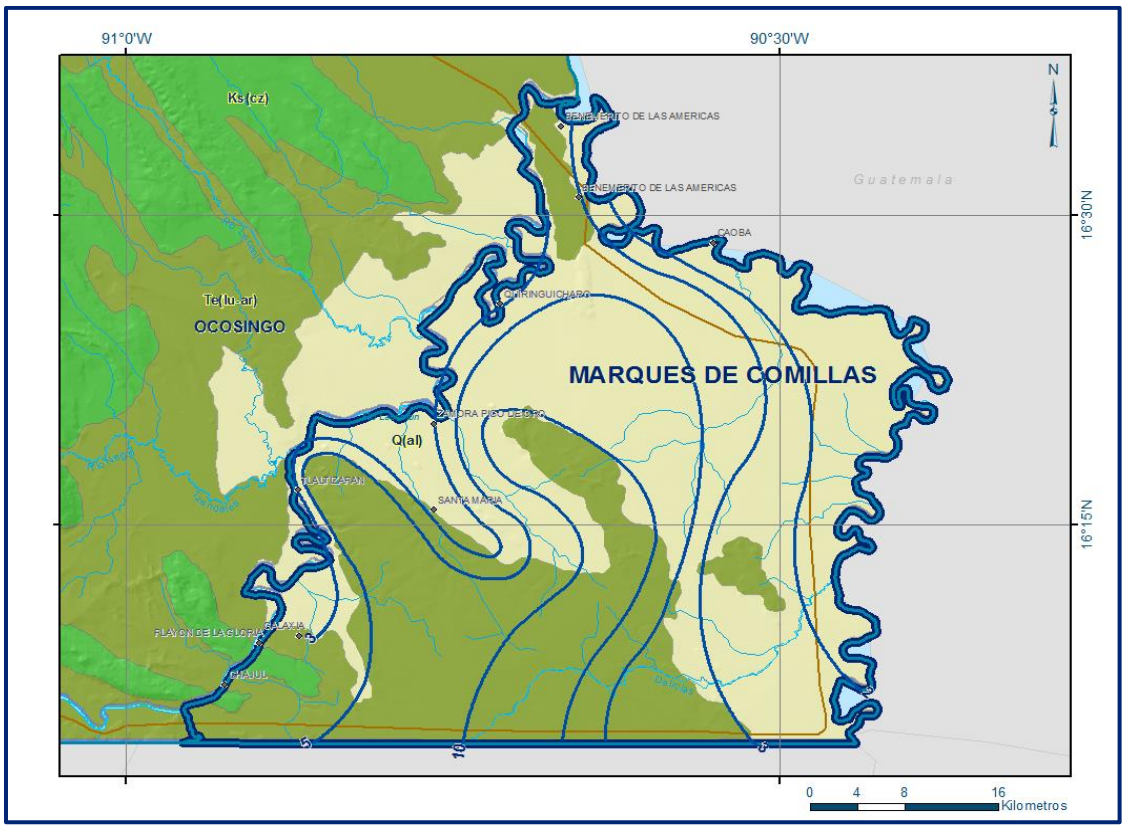


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4, se observa que los valores varían de 120 msnm, en la parte del acuífero que es límite con Guatemala, hasta 190 msnm que se presentan en el extremo oriental, descendiendo gradualmente a lo largo del cauce de los arroyos y desde los piedemonte, hacia su descarga natural en los ríos Lacantun y Chixoy.

De esta manera la configuración muestra el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

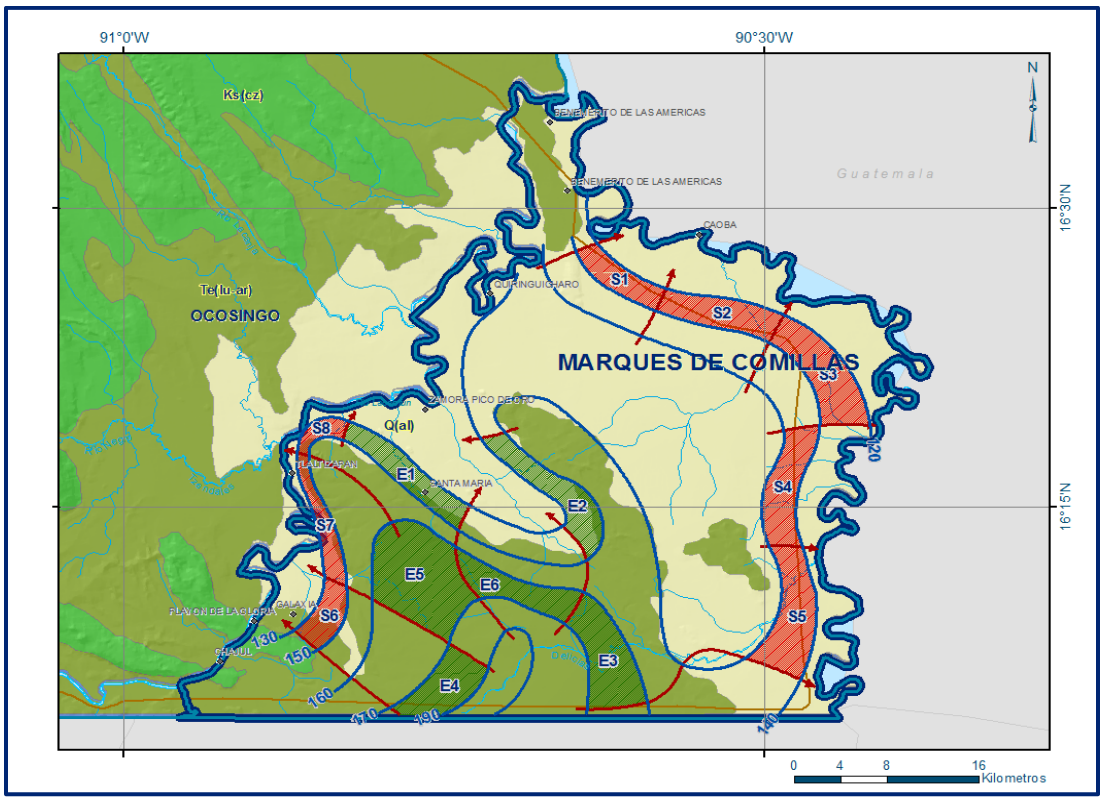


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero, por lo que no es posible realizar una configuración de evolución del nivel estático. Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), pH, Eh, Nitratos, iones mayoritarios y dureza total.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 15 a 472 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido 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, solamente un aprovechamiento sobrepasa el límite permisible con un valor de 1930 ppm.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Asociation (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 21 a 2,000 ⁄S/cm. Todos los valores de pH en el área de estudio se encuentran entre los límites máximos permisible que marca la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano, ya que se registran valores de 4 a 13, que representa agua ligeramente alcalina en la que existe predominio en el contenido de carbonatos, con respecto a los sulfatos. Los valores de temperatura registrados varían de 22.8 a 35.6.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad baja (C_1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2010, se registró un total de 60 aprovechamientos: 41 norias, 17 pozos y 2 manantiales, del total de aprovechamientos, 57 se encuentran activos y los restantes 3 inactivos permanentemente. El volumen de extracción asciende a **1.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.9 hm^3 (90 %) se destinan al uso doméstico y el 0.1 hm^3 (10 %) restantes se utilizan para el uso público urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010 en la superficie completa del acuífero, 2012 km^2, en la que se encuentran dispersos los aprovechamientos del agua subterránea.

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:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita sobre los depósitos aluviales y conglomerados que conforman los valles, así como la infiltración que se produce a lo largo de los escurrimientos superficiales (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la red de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Para este caso, dado que el volumen destinado para usos público-urbano y agrícola es pequeño, se considera que no existe recarga inducida. Por lo que **Ri = 0 hm³/año**.

7.1.1 Recarga vertical

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.
Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔVS) tiende a ser nulo y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:
Rv= Recarga vertical;
Eh= Entradas por flujo horizontal subterráneo;
B= Bombeo;
Sh= Salidas por flujo horizontal subterráneo;
ETR= Evapotranspiración;
ΔV(S)=Cambio en el volumen almacenado;

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

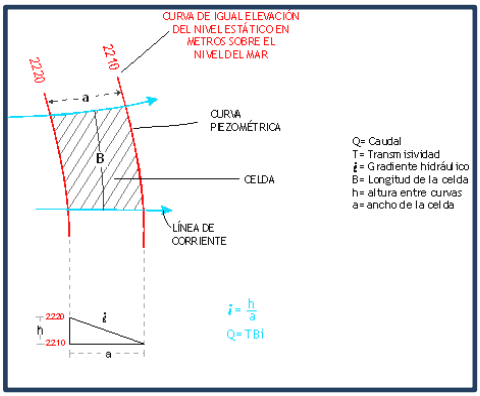
$$Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh \qquad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente a 2010, mostrada en la figura 4.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$



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 uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

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	12000	2545	20	0.0079	0.0015	0.1415	4.5
E2	12730	2180	20	0.0092	0.0015	0.1752	5.5
E3	9450	3635	10	0.0028	0.0008	0.0208	0.7
E4	6545	4725	20	0.0042	0.0015	0.0416	1.3
E5	5455	1970	10	0.0051	0.0008	0.0222	0.7
E6	11270	2180	10	0.0046	0.0008	0.0414	1.3
						Total entradas	**13.9**

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **13.9 hm³/año**.

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.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh), a través de evapotranspiración (ETR) y por Bombeo (B). El caudal de los dos únicos manantiales censados es muy pequeño y a pesar de que existen corrientes superficiales perennes, no se cuenta con información de estaciones hidrométricas. Además, el agua que conducen los ríos tiene su origen en las zonas topográficamente más altas que se ubican fuera del acuífero o en Guatemala y el río Lacantun es el límite compartido entre este acuífero y Ocosingo.

Por lo tanto, para fines del balance de aguas subterráneas, no se considera la descarga de manantiales, ni el flujo base de los ríos.

7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal

Las salidas subterráneas se evalúan de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la elevación del NE del año 2010 (figura 4), el cálculo se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo

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)
S1	9820	3270	20	0.0061	0.0010	0.0601	1.9
S2	9090	3270	20	0.0061	0.0010	0.0556	1.8
S3	10180	4000	20	0.0050	0.0003	0.0153	0.5
S4	11636	2910	10	0.0034	0.0003	0.0120	0.4
S5	11030	4000	10	0.0025	0.0010	0.0276	0.9
S6	6545	2180	20	0.0092	0.0010	0.0600	1.9
S7	10180	1455	20	0.0137	0.0003	0.0420	1.3
S8	6545	1820	20	0.0110	0.0010	0.0719	2.3
						Total salidas	**10.9**

El volumen total estimado de salidas por flujo subterráneo asciende a **10.9 hm^3 anuales**.

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). Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

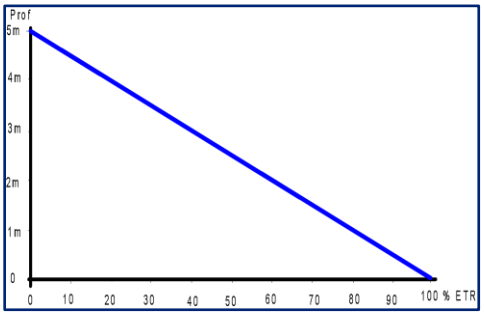
$$ETR\ (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	25.4		
P(mm) =	2473.7	P^2 =	6119191.69
L =	1754.3532	L^2 =	3077755.15
ETR (mm)	1455.6		

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 donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. De esta manera, tomando en cuenta una superficie de 300 km^2 de la zona aledaña al cauce de los ríos Lacantun en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y la lámina de evapotranspiración obtenida de 870.6 mm (con valores de 1,200 mm anuales para la precipitación y 20.0 °C de temperatura), de acuerdo con la gráfica, tenemos que la ETR = 300 km^2 (1.4556 m) (0.4) = 174.7. Por lo tanto, la **ETR = 174.7 hm^3/año**.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **1.0 hm^3/año.**

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **ΔV(S) = 0**.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (Rv), el cual será calculado a partir de la ecuación (2):

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

$$Rv = 10.9 + 1.0 + 174.7 - 0.0 - 13.9$$

$$Rv = 172.7 \ hm^3/año$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = Rv + Eh$$

$$R = 172.7 + 13.9$$

$$R = 186.6 \ hm^3/anuales$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$DAS = R - DNCOM - VCAS \qquad (3)$$

Donde:

DAS= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;
Rt= Recarga total media anual;
DNCOM= Descarga natural comprometida;
VCAS= Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso, su valor es de **186.6 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 Marqués de Comillas se considera que la descarga natural comprometida es de **174.7 hm³ anuales**, que corresponde al 100 % de la evapotranspiración que se debe mantener para sostener el gasto ecológico de la "Reserva Natural Marqués de Comillas" y el ecosistema ribereño de los ríos Lacantun y Chixoy. No se consideran comprometidas las salidas subterráneas porque tienden a descargar hacia los ríos Lacantun y Chixoy y su volumen es muy pequeño comparado con el caudal que conducen.

Por lo tanto, **DNC = 174.7 hm³/año.**

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **5,076,424 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 186.6 – 174.7– 5.076424
DMA = 6.823576 hm³/año

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **6,823,576 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de los acuíferos marqués de Comillas y Ocosingo, Estado de Chiapas. Realizado por la empresa ISO Desarrollo e Ingeniería, S.A. de C.V.