



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MARABASCO (0612), ESTADO DE
COLIMA**

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.....	5
3.1 Provincia fisiográfica.....	5
3.2 Clima.....	5
3.3 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía.....	8
4.2 Geología estructural	9
4.3 Geología del subsuelo.....	9
5. HIDROGEOLOGÍA.....	10
5.1 Tipo de acuífero.....	10
5.2 Parámetros hidráulicos.....	10
5.3 Piezometría.....	11
5.4 Comportamiento hidráulico.....	11
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	11
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	15
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	16
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	17
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	18
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	19
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	19
7.2 Salidas	20
7.2.1 Bombeo (B).....	20
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	20
7.2.3 Salidas subterráneas (Sh).....	22
7.2.4 Flujo base (Fb).....	23
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	23
8. DISPONIBILIDAD	24
8.1 Recarga total media anual (R).....	24
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	25
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	25
9. BIBLIOGRAFÍA	27

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 Marabasco, definido con la clave 0612 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción occidental del estado de Colima, en la zona costera del municipio de Manzanillo. Colinda al sur con el Océano Pacífico, al noroeste lo limita el Río Cihuatlán y colinda con los acuíferos Cihuatlán y Cuautitlán del estado de Jalisco, al noreste con los acuíferos Minatitlán y Santiago-Salagua; y al este con el acuífero Central Peña Blanca; todos ellos del estado de Colima (Figura 1). El acuífero se encuentra ubicado totalmente en el municipio de Manzanillo, Colima.

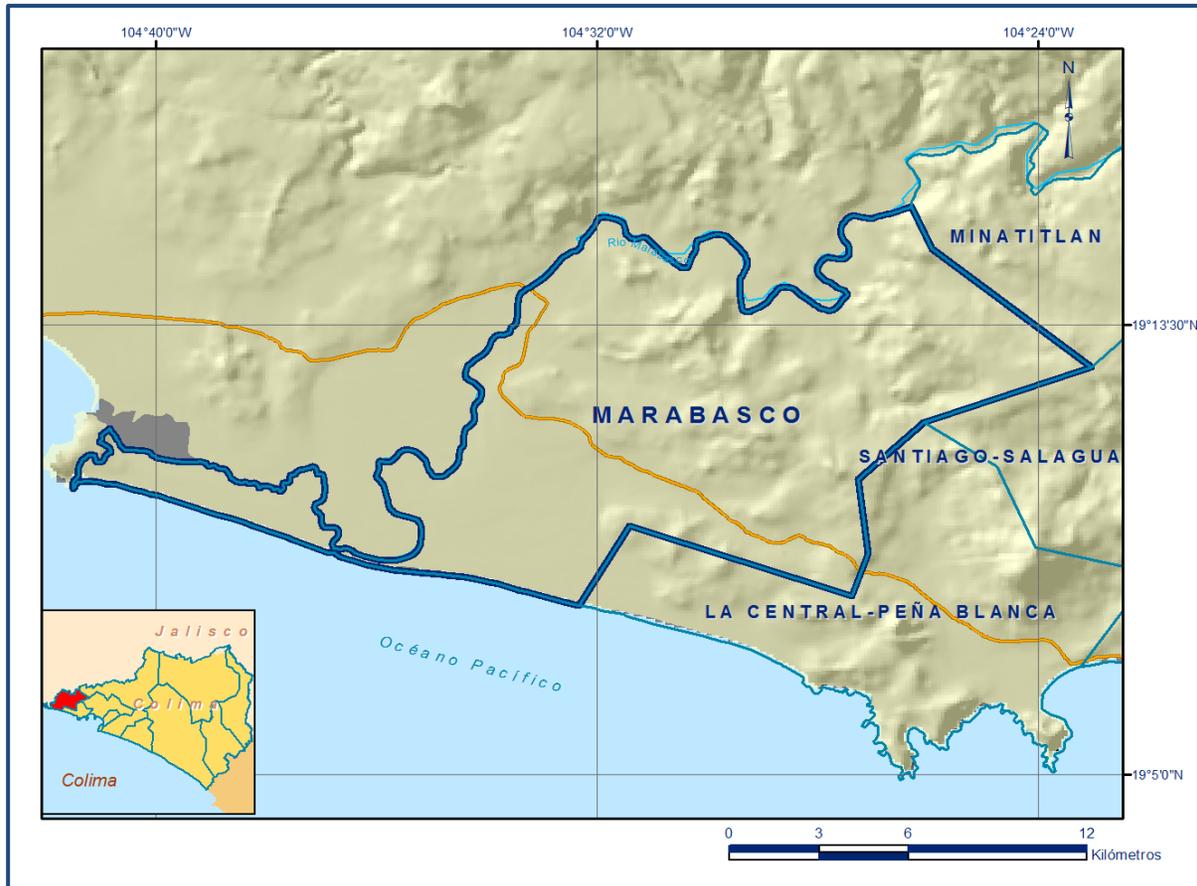


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 0612 MARABASCO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	23	1.5	19	12	42.1	
2	104	26	3.5	19	11	39.3	
3	104	27	14.7	19	10	34.7	
4	104	27	4.9	19	9	10.1	
5	104	27	21.6	19	8	22.1	
6	104	31	24.3	19	9	42.3	
7	104	32	18.6	19	8	12.1	DEL 7 AL 8 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
8	104	41	29.5	19	10	24.2	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE ESTATAL
9	104	27	57.7	19	14	26.9	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	104	26	17.8	19	15	44.7	
11	104	25	54.5	19	14	56.4	
1	104	23	1.5	19	12	42.1	

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la región Hidrológico-administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico y se encuentra sujeto a las disposiciones del Decreto de Veda de Aguas del Subsuelo tipo II “Zona Costera del Estado de Colima”, publicado el 20 de agosto de 1973 y comprende la Costa de Colima, cuya extensión y límites geopolíticos corresponden a los Municipios de Manzanillo, Armería y Tecomán, del Estado de Colima. La veda establece que “excepto cuando se trate de extracciones para uso doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia del presente decreto nadie podrá ejecutar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la Autoridad del Agua; ni extraer o aprovechar las mencionadas aguas sin la concesión o asignación que expida también según el caso”.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Estudios geohidrológicos de los Valles Costeros Aledaños a la Bahía de Manzanillo.

PROYESCO, S.A. 1978. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial hidráulico y definir las fuentes de abastecimiento de agua de buena calidad. Se efectuaron las siguientes actividades: reconocimientos hidrogeológicos de campo, censo de aprovechamiento, nivelación de brocales, recorridos piezométricos, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, muestreo y análisis fisicoquímico, sondeos eléctricos verticales. Incluye los Valles de La Central, Santiago-Salagua, Valle Jalipa-Tapeixtles, Valle El Colomo y algunas actividades para el Valle de Cihuatlán, que incluye la porción del actual acuífero Marabasco.

Sinopsis Geohidrológica del Estado de Colima. 1990. Se presenta un resumen de los aspectos climatológicos, fisiográficos, geológicos, de hidrología superficial, y condiciones geohidrológicas de los acuíferos del Estado de Colima.

Trabajos de campo efectuados por la Dirección Local de la CONAGUA, 2006.

Integración del censo de aprovechamientos e hidrometría para distintos años; el más reciente corresponde con el año 2006.

Actualización de mediciones piezométricas en los acuíferos de Colima, El Colomo, Santiago-Salagua y Marabasco en el Estado de Colima. 2007. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua por la empresa consultora Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo S.A. de C.V. Incluye piezometría, muestreo y análisis fisicoquímico.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Marabasco se ubica dentro de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur, cuyo drenaje principal lo constituyen las corrientes que fluyen de la sierra hacia el mar.

Esta provincia se caracteriza por tener un relieve variado que incluye sierras, valles y llanuras costeras. Las sierras están ampliamente distribuidas en toda la provincia y alcanzan elevaciones que varían desde 500 metros sobre el nivel del mar (msnm), en la porción Centro-Occidental, hasta más de 2,400 msnm en la porción noroeste.

La red de drenaje está compuesta por cauces poco profundos en forma de “V” con pendiente pronunciada en las montañas y suave en los lomeríos. Los valles se encuentran en las partes bajas de las cuencas, son estrechos y tienen drenaje paralelo con arroyos de poca pendiente. Las llanuras están diseminadas en la faja costera, separadas por cadenas montañosas que desde las sierras se extienden hasta el litoral.

3.2 Clima

Prevalece el clima tropical lluvioso. La temporada de lluvias comprende los meses de junio a octubre. La precipitación más abundante se registra en los meses de julio a septiembre, durante los cuales son frecuentes las lluvias torrenciales de origen ciclónico.

El estiaje abarca de noviembre a mayo, con la lámina media mensual menor que 15 mm.

Debido a su posición geográfica, a su condición costera y a las corrientes de aire marítimo, el clima predominante en el estado de Colima es cálido subhúmedo con lluvias en verano A(W); sin embargo, a pesar de su extensión reducida existe una diversidad climatológica, la cual se describe en la tabla 2.

Tabla 2. Climatología del estado de Colima

CLIMA	SÍMBOLO	% DEL ESTADO
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	A(W)	78.8
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	AC(W)	7.8
Templado subhúmedo con lluvias en verano	C(W)	2.0
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	C(E) (W)	0.6
Semiseco muy cálido y cálido	BS(h)	10.8

Fuente: C.G.S.N.E.G.I. Cartas de Colima

Temperatura media anual

De acuerdo con los resultados de la estación climatológica Cihuatlán (DGE), que es la más próxima a la zona de estudio, la temperatura media anual es de 26.4 °C, para el período comprendido entre el año 1961 y 2000.

Precipitación media anual

La precipitación media anual, obtenida de la estación climatológica Cihuatlán (DGE) para el período 1961-2000, es igual a 910 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero está comprendido en la Región Hidrológica No. 15, denominada Costa de Jalisco. Esta región hidrológica comprende parte de la cuenca Chacala-Purificación, a la que pertenece el acuífero en estudio.

Cuenca

El acuífero se ubica en la Cuenca denominada Chacala-Purificación. La parte norte del acuífero corresponde con la Subcuenca del Río Chacala y la porción sur del acuífero pertenece a la Subcuenca Laguna de Cuyutlán. Dentro de la Subcuenca de Cuyutlán, cuya extensión superficial es de 508 km², las corrientes principales nacen en la sierra Perote, cruzan valles intermontanos en las direcciones norte-sur y noreste-suroeste e ingresan a la planicie costera para desembocar al Océano Pacífico en la Bahía de Manzanillo o en la Laguna de Cuyutlán (Sinopsis Geohidrológica).

Dentro de las corrientes superficiales del estado de Colima que desembocan en el Océano Pacífico, destaca el río Cihuatlán. Este río es el límite norte y occidental del acuífero Marabasco. El Río Cihuatlán nace de la confluencia de varios arroyos en la porción sur de Jalisco a una elevación de 2,600 msnm, 15 km aproximadamente al norte del poblado de Minatitlán, Estado de Jalisco.

Los primeros 30 km, el río corre de norte a sur hasta llegar al límite de esa entidad con el estado de Colima, donde cambia de dirección hacia el suroeste en un trayecto de 65 km.

Desde este sitio hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, constituye la frontera política entre ambas entidades federativas. Al llegar a la costa forma pequeñas lagunas y esteros, siendo el más importante el estero Potrero Grande. En su recorrido recibe varios tributarios, entre ellos el más importante es el río Marabasco.

El río Cihuatlán tiene un régimen permanente. Los hidrogramas construidos en el intervalo 1965-1977 para el río Cihuatlán en la estación hidrométrica del mismo nombre, permiten obtener un flujo base de $61 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{año}$ en el período de estiaje. 0.5 hm^3 .

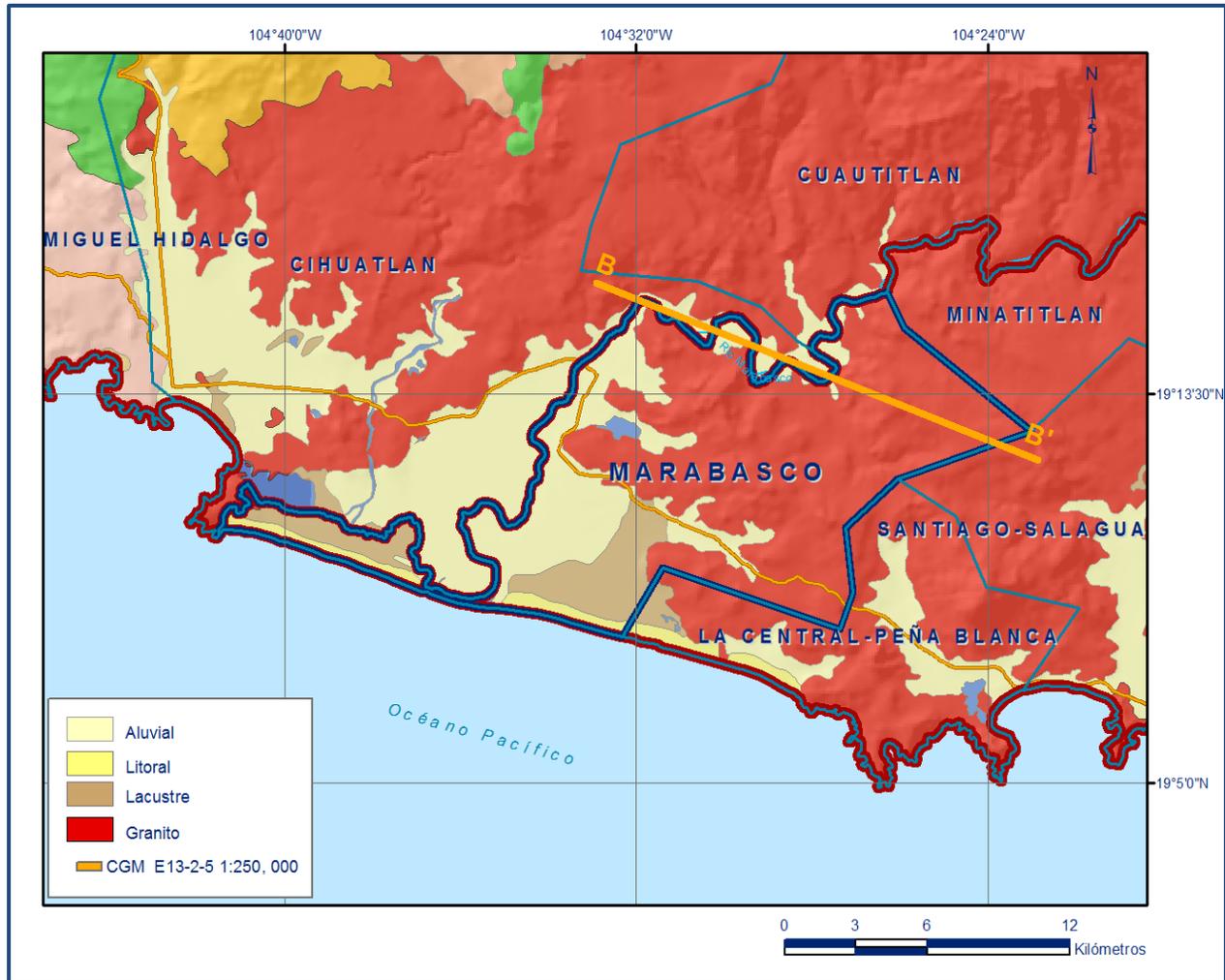
3.4 Geomorfología

Localmente se distinguen dos expresiones fisiográficas: la región montañosa y la región costera; en ésta última, los agentes erosivos han modelado el paisaje de cinco cuencas abiertas, de las cuales una de ellas corresponde con el acuífero, cuyo drenaje es hacia el mar. Las fronteras laterales al flujo del agua subterránea coinciden con los contactos entre los sedimentos fluviales y las rocas impermeables que bordean el valle.

4. GEOLOGÍA

El acuífero está formado por un relieve irregular de rocas intrusivas graníticas, las cuales fueron erosionadas por el antiguo cauce del Río Cihuatlán, que fue rellenado posteriormente por materiales aluviales.

La geología de la zona se define por la presencia de un batolito de tipo granítico que predomina en el acuífero Marabasco. Estas rocas han estado sujetas a un intenso intemperismo y erosión que han rellenado el valle de materiales aluviales (figura 2).



4.1 Estratigrafía

Granito (Ksgr)

Está formado por un intrusivo batolítico de composición granítica y de edad cretácica que constituye las elevaciones que rodean al valle. Este granito ha estado expuesto a un fuerte intemperismo debido a las condiciones climáticas imperantes, por lo que ha desarrollado una capa de espesor variable de alteración, que forma localmente suelos residuales que enmascaran en muchas ocasiones el contacto real con los materiales aluviales.

Este granito en estado sano es una roca sumamente compacta e impermeable que no permite el paso del agua a través de ella.

Sin embargo, la zona de alteración, que generalmente es arenosa empacada con arcilla, puede retener temporalmente el agua de precipitación y comunicarla lateralmente hacia los valles.

Aluvión (Qal)

Los materiales de aluvión en la zona de estudio están formados principalmente por arenas, gravas y limos que constituyen los rellenos de los valles costeros. Debido a las condiciones sedimentológicas que prevalecieron durante su depósito, presentan generalmente alta permeabilidad, la cual se reduce conforme se acerca a la Planicie Costera y a las lagunas o descargas hacia el mar.

En la parte baja del Valle de Marabasco se presentan depósitos lacustres más arcillosos, que disminuyen la permeabilidad o forman lentes menos permeables.

4.2 Geología estructural

Los principales elementos geológicos estructurales de la zona son intrusiones ígneas, fracturas, así como fallas normales de gran longitud con orientación norte-sur, provocadas por fuerzas tensionales, que dieron lugar a fosas y altos estructurales.

El intemperismo y erosión de las rocas graníticas han modelado la actual expresión morfológica del valle de Marabasco. Este valle se originó a partir de zonas de debilidad de la corteza terrestre, lo que favoreció el labrado de profundos cañones por medio de los escurrimientos superficiales.

4.3 Geología del subsuelo

PROYESCO (1978) realizó 2 sondeos eléctricos verticales en el acuífero Marabasco, que permiten identificar tres unidades geoeléctricas.

La unidad más superficial se divide en dos horizontes. El primero con resistividad de 20 a 35 ohm-m y espesor medio de 2 m corresponde a la capa superficial de materiales de granulometría fina como arcillas y limos. El segundo horizonte presenta resistividades de 15 a 25 ohm-m con un espesor de 38 m y acunándose hasta alcanzar solamente un espesor de 18 m; este horizonte eléctrico se relaciona con una posible zona acuífera, con predominio de materiales arcillosos. La unidad geoeléctrica intermedia presenta resistividades de 30 a 50 ohm-m, con espesor de 34 m; ésta se relaciona con posible material acuífero de granulometría arenosa.

La tercera unidad presenta resistividad del orden de 245 a 310 ohm-m identificada a una profundidad de 52 m en un sondeo y a 74 m en el otro sondeo. Esta unidad geoelectrónica se relaciona con el basamento granítico, con incipiente grado de alteración en su parte más alta.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de tipo libre y está constituido por depósitos aluviales formados por gravas y arenas, cuyo espesor varía de 35 m, en la porción norte, a 120 m en la porción sur.

Las rocas graníticas inalteradas constituyen las barreras al flujo subterráneo y el basamento del acuífero. Sus fronteras físicas son al poniente el río Cihuatlán y el acuífero Cihuatlán, estado de Jalisco, y al sur el Océano Pacífico.

La recarga proviene de la infiltración de la lluvia que ocurre en las laderas de las montañas y que ingresan a la zona de explotación como entradas subterráneas, y de la precipitación pluvial que se infiltra sobre el valle. Su descarga se efectúa por medio de bombeo de agua subterránea, por evapotranspiración, salidas subterráneas y flujo base en el Río Cihuatlán.

5.2 Parámetros hidráulicos

Las características hidráulicas de los acuíferos aluviales dependen de su granulometría y espesor.

En general en los acuíferos costeros de Colima el coeficiente de transmisividad varía de 0.005 a 0.05 m²/s; los valores mayores se registran en las porciones de la planicie costera y en las inmediaciones de los cauces principales, donde predominan los clásicos gruesos muy permeables.

Estos valores de transmisividad son característicos de acuíferos de tipo libre; se estima que su coeficiente de almacenamiento es equivalente a su porosidad efectiva y toma valores entre 0.12 y 0.25, dependiendo de la granulometría de los clásicos en que oscila la superficie freática.

Sin embargo, el valor de este coeficiente puede ser mucho menor en aquellas áreas donde el acuífero está semiconfinado por estratos de materiales limo-arcillosos (Sinopsis Geohidrológica). Se considera que el valor del coeficiente de almacenamiento y el valor de la porosidad eficaz por rendimiento específico (S_y) es de 0.15.

5.3 Piezometría

Las configuraciones piezométricas proporcionan valiosa información acerca de la circulación del agua en el subsuelo. El agua ingresa al acuífero desde las áreas de recarga que se localizan en flancos montañosos, abanicos aluviales y cauces de corrientes alimentadoras, localizadas en las partes altas de valles y planicies; y transita hacia las áreas de descarga bajo el control de la geología subterránea.

En condiciones naturales, el gradiente hidráulico tenía fuertes variaciones en el área, determinadas por cambios en la permeabilidad y en la sección de los acuíferos o por variaciones en el caudal de flujo.

A lo largo de las trayectorias de flujo, una parte del caudal afloraba en los cauces o era transpirado por la vegetación nativa, el resto continuaba su curso subterráneo hacia aguas abajo y, finalmente escapaba al mar (Sinopsis Geohidrológica).

La posición de los niveles estáticos del agua subterránea con respecto a la superficie del terreno varía dependiendo de la distribución de la recarga y del bombeo, de la configuración topográfica y de la transmisividad de los acuíferos.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En las planicies costeras los niveles freáticos afloran en las proximidades del litoral. Desde esas áreas, la profundidad a los niveles del agua aumenta gradualmente hacia aguas arriba, debido a que el gradiente hidráulico es menor que la pendiente topográfica.

En el acuífero, en 1997 la profundidad al nivel estático era de 0 m en las proximidades de la costa, de la Laguna y de la zona de Esteros Potrero Grande; y de 3 m al oriente de la población Cihuatlán y al oeste de los poblados San Carlos, Las Vishis y Las Ácidas, como se observa en la figura 3.

En el año 2007 la profundidad al nivel estático variaba de 0.5 m, en las proximidades de la zona de esteros Potrero Grande y de La Laguna, pero en la zona de estanques acuícolas, localizada a 1 km al norte del aeropuerto, la profundidad al nivel estático para ese año era de 3 m.

En la porción norte del acuífero, en el poblado Marabasco, la profundidad al nivel estático registrada para este año fue 13 m, como se observa en la figura 4.

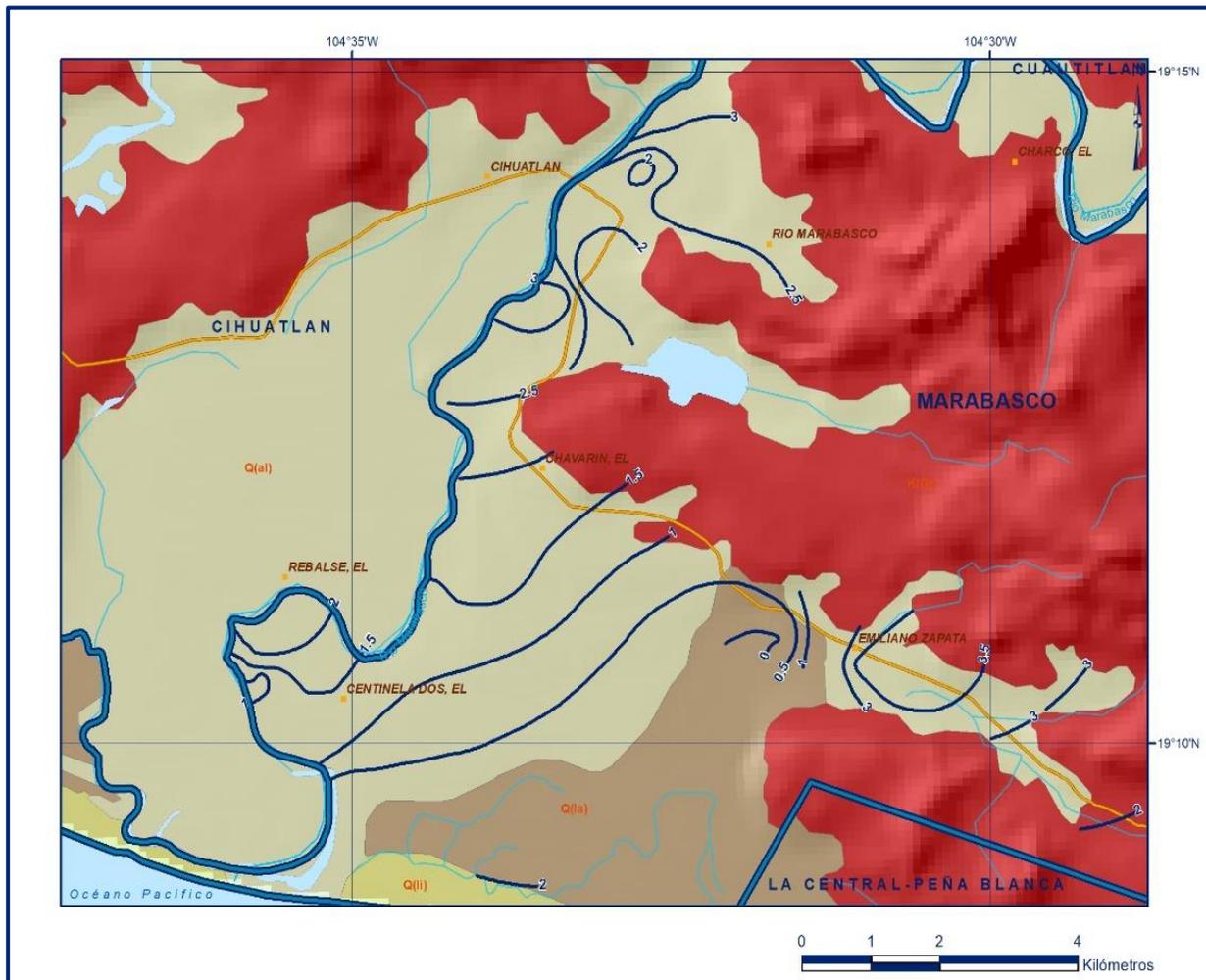


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (1997)

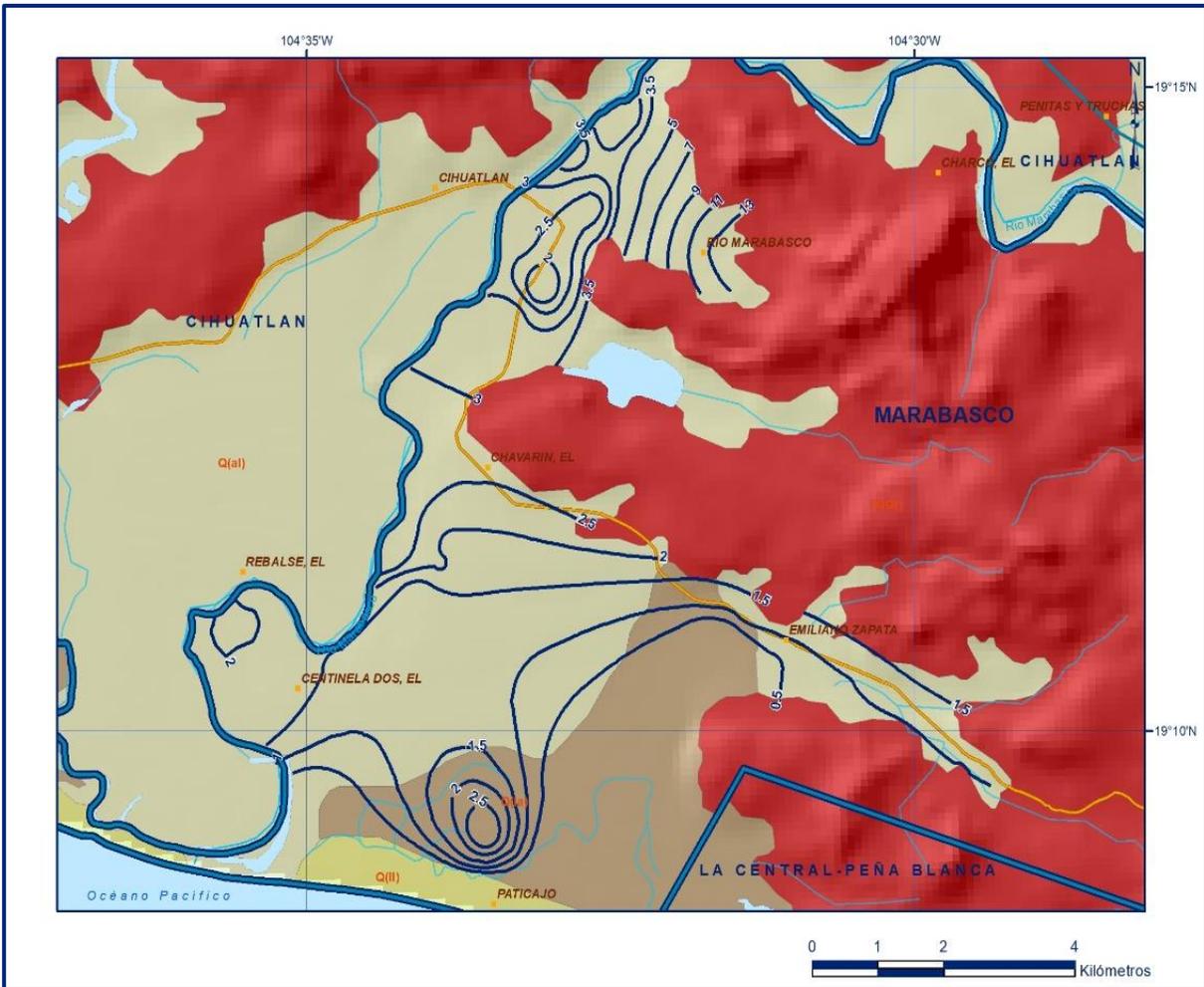


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Las menores elevaciones al nivel estático en el año 1997 eran de 0 msnm, en la zona cercana a la costa, y de 1 msnm bordeando la zona de La Laguna y la zona de esteros Potrero Grande.

Las mayores elevaciones se observaban al norte, a la altura del Poblado Marabasco, donde variaron de 16 a 20 msnm y en la porción sureste del acuífero donde alcanzan hasta 50 msnm (figura 5).

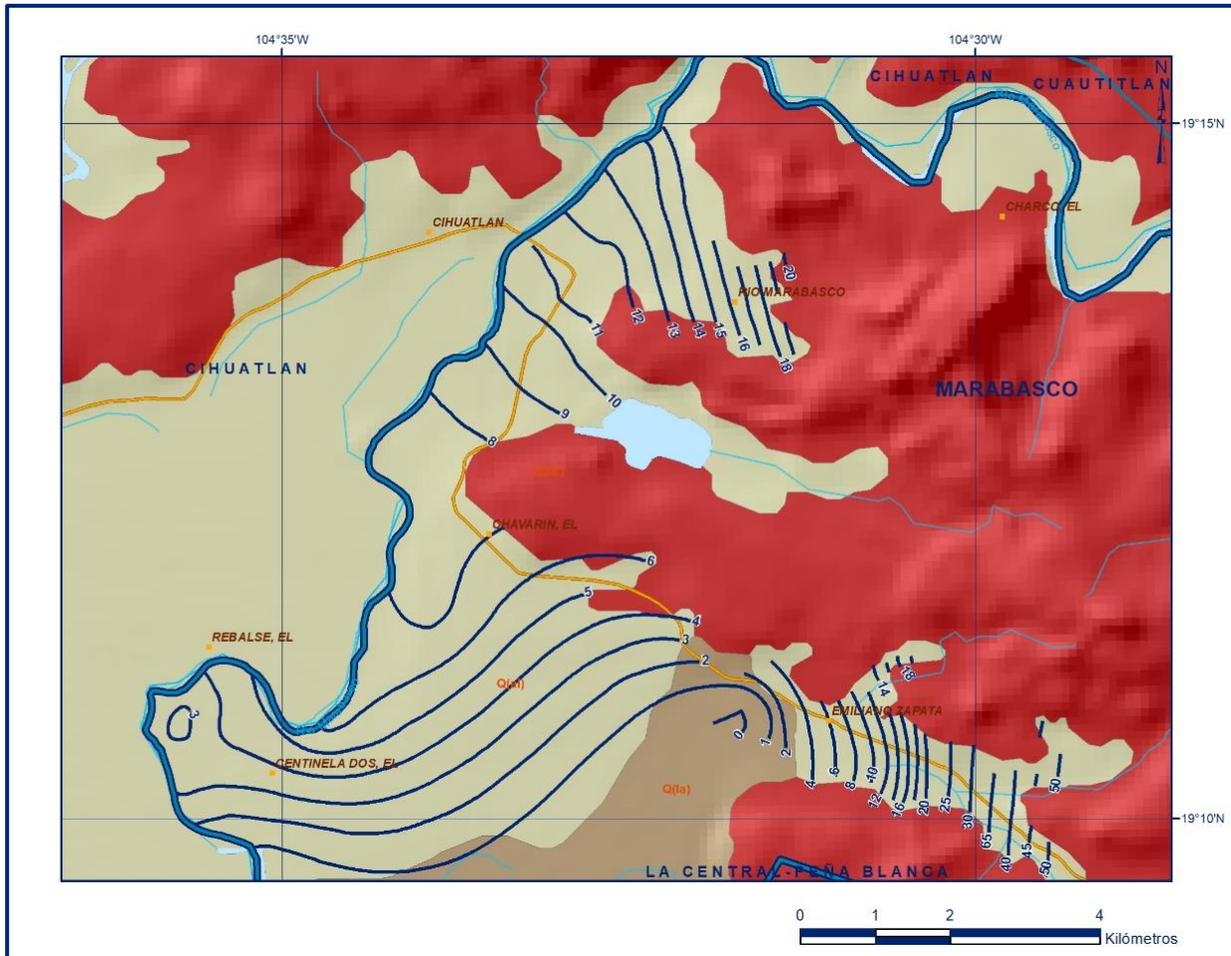


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (1997)

Para el año 2007 las elevaciones al nivel estático eran de 0 msnm en la zona de Estanques Acuícolas y al norte de la Laguna, de 1 msnm en la zona que rodea al Estero Potrero Grande.

En el poblado Marabasco la elevación del nivel estático era de 15 msnm, y alcanzaba 18 m en el poblado Las Ácidas, localizado en la porción sureste de la zona con información piezométrica (figura 6).

De la configuración de nivel estático del año 2007 se observa que la dirección de flujo subterráneo en el acuífero Marabasco sigue siendo paralelo al Río Cihuatlán desde las zonas de recarga hacia la zona de descarga ubicadas hacia la laguna, los esteros Potrero Grande. Es evidente también la existencia de descarga por flujo base hacia el Río Cihuatlán.

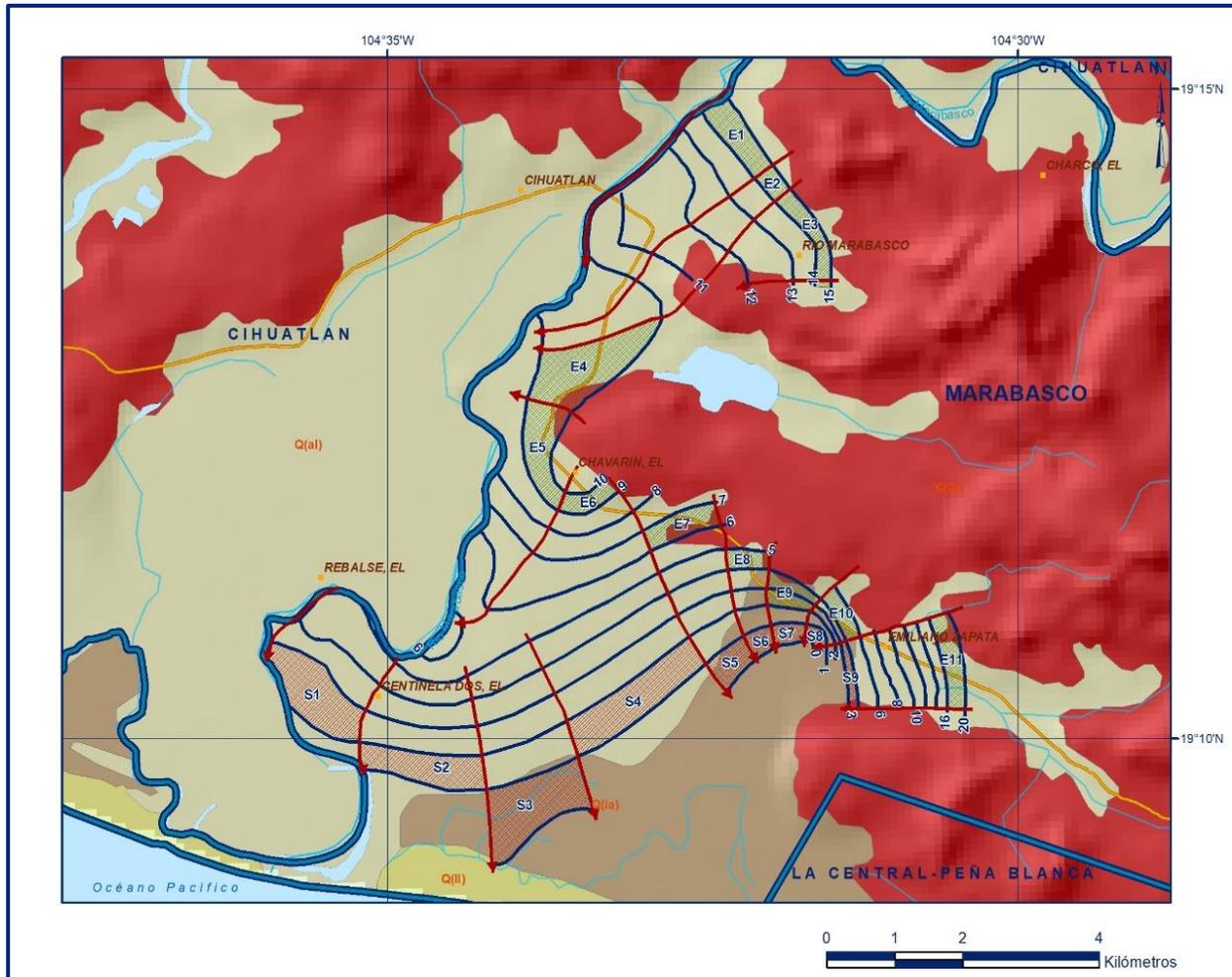


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

En el período 1997-2007 la evolución varió de 3 m en los poblados Las Ácidas y San Carlos; de 1.4 m en el poblado Marabasco, hasta -0.1 m en las vecindades del río Cihuatlán y -0.7 m en el poblado de Cihuatlán (figura 7).

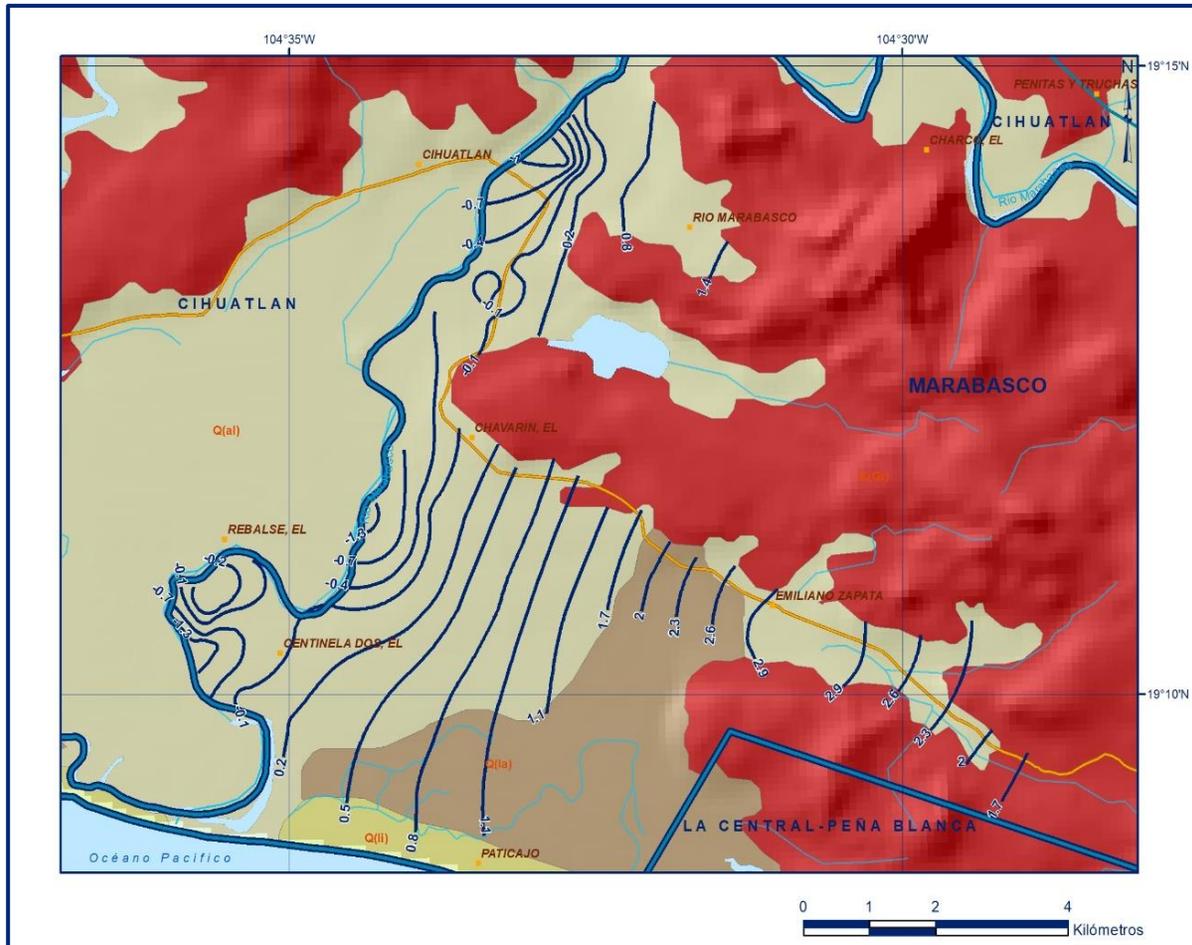


Figura 7. Evolución del nivel estático en m (1997-2007)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La concentración de sales en el agua subterránea de los acuíferos del estado de Colima es en general baja. El valor promedio es de 500 partes por millón (ppm) de sólidos totales disueltos (STD), en todas las zonas geohidrológicas.

Esta característica hidrogeoquímica tan favorable, se debe a la combinación de varios factores: La corta permanencia del agua en el subsuelo, derivada de su rápida circulación a través de medios de alta permeabilidad y de dimensiones relativamente reducidas; la gran resistencia al ataque químico del agua, de las rocas acuíferas predominantes ígneas fracturadas y clásticos gruesos derivados de su erosión y la abundante precipitación pluvial. Calcio, Sodio y bicarbonato son los iones disueltos predominantes en esas aguas, procediendo los dos primeros de la disolución de los feldespato cálcicos y sódicos constituyentes de las rocas ígneas. (Sinopsis Geohidrológica)

Del muestreo efectuado en el año 2007, se observa que la concentración de Sólidos Totales Disueltos varía desde 170 ppm en la zona del poblado Marabasco, hasta alcanzar un máximo de 870 ppm, registrado en el poblado La Palma.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Durante el año 2006 se censaron 223 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 169 son norias, 53 son pozos y 1 manantial. Para uso agrícola se destinan 123 norias y 41 pozos; 2 norias y 5 pozos para agua potable; 24 norias, 5 pozos y un manantial para uso pecuario; 18 norias y un pozo para uso doméstico; una noria para uso industrial y un pozo para servicios (tabla 3).

Tabla 3. Censo de aprovechamientos del acuífero Marabasco (2006)

Uso	Aprovechamientos			
	Pozos	Norias	Manantial	Total
Agrícola	41	123	0	164
Público urbano	5	2	0	7
Doméstico	1	18	0	19
Industrial	0	1	0	1
Pecuario	5	24	1	30
Acuícola	0	1	0	1
Servicios	1	0	0	1
	53	169	1	223

De acuerdo con la hidrometría del año 2006, del acuífero se extraen 11.5 hm³ anuales de agua subterránea para los distintos usos. De ellos, 10.8 hm³/año son utilizados por el sector agrícola, 0.6 hm³/año para uso público-urbano y los 0.1 hm³/años restantes para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero (Tabla 4).

Tabla 4. Volúmenes de extracción de agua subterránea en el acuífero (hm³/año)

Uso	Volumen de extracción
Agrícola	10.8
Público-urbano	0.6
Doméstico-abrevadero	0.1
Industrial y servicios	0.0
Total	11.5

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 definido.

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

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

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

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

El período de balance es 1997-2007. Se definió un área de balance de 56.6 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos.

La ecuación de balance propuesta es la siguiente:

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

Donde:

Eh: Entrada subterráneas por flujo horizontal

Rv: Recarga vertical por lluvia

B: Bombeo

ETR: Evapotranspiración

Sh: Salida subterránea por flujo horizontal

Fb: Flujo base

$\Delta\text{V(S)}$: Cambio en el volumen de almacenamiento

7.1 Entradas

La recarga total (R) al acuífero está integrada básicamente por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle y de la recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas de pie de monte.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que precipita en las zonas altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación localizada en la planicie.

En la figura 6 se observa la configuración de elevación del nivel estático mostrada en el año 2007, el área de balance y las celdas de flujo consideradas para el cálculo de entradas y salidas subterráneas. Con base en esta configuración se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero subterráneamente.

$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Ancho (m) del canal de flujo.

i: Gradiente hidráulico ($i = (h_2 - h_1)/L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T: Transmisividad (m^2/s) en el canal de flujo.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas fueron tomados del Estudio Geohidrológico de los Valles Costeros Cercanos a Manzanillo, en el estado de Colima, desarrollado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

Por correlación geológica e hidrogeológica con otros acuíferos costeros del Estado de Colima, en los que las pruebas de bombeo efectuadas obtienen valores de transmisividad de $0.010 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, se utilizó este valor para el cálculo de las entradas subterráneas. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas. En la tabla 5 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **16.5 hm³/año**.

Tabla 5. Entradas subterráneas por flujo horizontal

Celda	Ancho (m)	L (m)	Delta h (m)	Gradiente	Transmisividad (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)	Entrada subterránea (hm ³ /año)
E1	1252	355	1	0.0028	0.010	0.035	1.1
E2	418	305	1	0.0033	0.010	0.014	0.4
E3	1427	207	1	0.0048	0.010	0.069	2.2
E4	1146	1144	1	0.0009	0.010	0.010	0.3
E5	1502	352	1	0.0028	0.010	0.043	1.3
E6	824	282	1	0.0035	0.010	0.029	0.9
E7	1066	361	1	0.0028	0.010	0.030	0.9
E8	588	273	1	0.0037	0.010	0.022	0.7
E9	777	184	1	0.0054	0.010	0.042	1.3
E10	769	205	1	0.0049	0.010	0.038	1.2
E11	1365	285	4	0.0140	0.010	0.192	6.0
Total de entradas subterráneas							16.5

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por evapotranspiración (ETR), flujo base al río Cihuatlán (Fb), salidas subterráneas (Sh) hacia la laguna y la zona del Estero Potrero Grande.

7.2.1 Bombeo (B)

La extracción de agua subterránea en el área de estudio es del orden de **11.5 hm³/año**. Este volumen se emplea principalmente para uso agrícola.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

El fenómeno de evapotranspiración ocurre en gran parte del área de balance del acuífero Marabasco, en un área aproximada de 51 km², donde el nivel de saturación se encuentra a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

Se aplicó el método de Coutagne para calcular que la lámina de evapotranspiración real es de 726 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 26.4 °C y precipitación de 910 mm.

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de agua subterránea, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso.

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el porcentaje de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc. Se consideraron las curvas menores e iguales a 10 m, se calculó el área entre ellas y se tomó el valor promedio entre curvas. Por ejemplo, entre las curvas de 3 y 4 m, el valor promedio considerado fue 3.5 m.

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, se ponderó de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente; en el ejemplo, el valor medio de profundidad fue de 3.5 m, por lo que se multiplicó por 0.65, que significa que, a esta profundidad, el 65 % es susceptible de evapotranspirarse.

Las mismas consideraciones se hicieron para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m. Al final se obtuvo la suma de los volúmenes de evapotranspiración. Para el cálculo de la evapotranspiración del Acuífero Marabasco, se omitió la zona costera de laguna y del estero Potrero Grande, debido a que en ellas se presenta la influencia del agua marina.

Por esta razón para la estimación del valor de la evapotranspiración se tomó como referencia la superficie que se encuentra aguas arriba de la curva de elevación del nivel estático de 1 msnm.

El resultado de este proceso se presenta en la tabla 6, en la que se muestra que el valor de la evapotranspiración real calculado es de **10.7 hm³/año**.

Tabla 6. Cálculo de la Evapotranspiración real

Profundidad (m)	Profundidad considerada (m)	Fracción	Área (km ²)	ETR (106 m ³)
9 a 10	9.5	0.05	0.17	0.01
8 a 9	8.5	0.15	0.203	0.02
7 a 8	7.5	0.25	0.254	0.05
6 a 7	6.5	0.35	0.305	0.08
5 a 6	5.5	0.45	0.359	0.12
4 a 5	4.5	0.55	0.611	0.24
3 a 4	3.5	0.65	0.771	0.36
3 a 3.5	3.25	0.675	2.944	1.44
3	3	0.7	0.123	0.06
2.5 a 3	2.75	0.725	4.156	2.19
2.5	2.5	0.75	0.366	0.20
2 a 2.5	2.25	0.775	4.648	2.62
1.5 a 2	1.75	0.825	4.034	2.42
1 a 1.5	1.25	0.875	0.018	0.01
0.5 a 1	0.75	0.925	1.031	0.69
0 a 0.5	0.25	0.975	0.28	0.20
Total de evapotranspiración				10.7

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas que ocurren como descarga hacia la laguna y del estero Potrero Grande fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático y celdas de flujo presentadas en la figura 8. La transmisividad en las celdas de flujo de salida, corresponde a la más baja reportada en la zona de estudio debido al predominio de sedimentos lacustres. Las salidas subterráneas se evaluaron en **4.2 hm³/año**, tal como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de salidas subterráneas

Celda	Ancho (m)	Longitud (m)	Delta h (m)	Gradiente	Transmisividad (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)	Salida subterránea (hm ³ /año)
S1	1701	682	1	0.0015	0.005	0.012	0.4
S2	1771	422	1	0.0024	0.005	0.021	0.7
S3	1474	721	1	0.0014	0.005	0.010	0.3
S4	2154	526	1	0.0019	0.005	0.020	0.6
S5	637	422	1	0.0024	0.005	0.008	0.2
S6	363	370	1	0.0027	0.005	0.005	0.2
S7	449	303	1	0.0033	0.005	0.007	0.2
S8	334	186	1	0.0054	0.005	0.009	0.3
S9	973	118	1	0.0085	0.005	0.041	1.3
Total de salidas subterráneas							4.2

7.2.4 Flujo base (Fb)

En el acuífero todavía ocurre una descarga hacia el río Cihuatlán, de acuerdo con la configuración de elevación al nivel estático y el hidrograma del mismo río en la Estación Cihuatlán. Para el año 2007 durante la temporada de estiaje se registró un gasto promedio de 0.07 m³/s, que corresponde con un flujo base o descarga del acuífero hacia el río de **2.2 hm³/año**.

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

La configuración de elevación del 2007 permite observar que no existen conos de abatimiento en la zona de estudio, ni deformación de las curvas de igual elevación causadas por la concentración del bombeo.

De igual manera, existen aún descargas naturales por flujo base y salidas subterráneas hacia la laguna y la Zona del Estero Potrero Grande. Adicionalmente, la evolución para el período 1997-2007 registra variaciones mínimas y muy puntuales. Todo esto permite inferir que el cambio de almacenamiento en el acuífero tiende a ser nulo.

Por lo tanto, para fines del balance de aguas subterráneas. **$\Delta V(S) = 0.0$** .

Solución de la ecuación de balance:

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procede a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2):

$$\begin{aligned} R_v &= B + ETR + Sh + Fb - \Delta V(S) - E_h \quad (2) \\ R_v &= 11.5 + 10.7 + 4.2 + 2.2 - 0.0 - 16.5 \\ R_v &= 12.1 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

De esta manera la recarga total media anual:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h = 12.1 + 16.5 \\ R &= 28.6 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

En la tabla 8 se presenta el resumen del balance del acuífero.

Tabla 8. Resumen del balance de aguas subterráneas del acuífero

ENTRADAS (hm ³ /año)		SALIDAS (hm ³ /año)	
Entrada subterránea	16.5	Bombeo	11.5
Recarga vertical	12.1	Salida subterránea	4.2
		Evapotranspiración	10.7
		Flujo base	2.2
		Cambio de almacenamiento	0.0
TOTAL DE ENTRADAS	28.6	TOTAL DE SALIDAS	28.6

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:

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

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 el acuífero Marabasco es de **28.6 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 Marabasco, la descarga natural comprometida es de **9.6 hm³ anuales**, de los cuales 4.2 hm³ corresponden a las salidas subterráneas hacia el mar que se deben dejar escapar para mantener el equilibrio de la interfase marina y los 5.4 hm³ restantes corresponden al 50 % de la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema costero.

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 **17,807,427 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 28.6 - 9.6 - 17.807427 \\ \text{DMA} &= 1.192573 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,192,573 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1974. "Informe de Terminación del Estudio Geohidrológico Preliminar en los Valles de Tecomán y Manzanillo, Colima". HIDROTEC S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1975. "Ampliación del Estudio Geohidrológico de los Valles Costeros cercanos a Manzanillo, en el Estado de Colima". Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

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

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