CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO PLAYA AZUL (1618), ESTADO DE MICHOACÁN

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 5
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1 Provincia fisiográfica 6
3.2 Clima 6
3.3 Hidrografía 7
3.4 Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 8
4.1 Estratigrafía 10
4.2 Geología estructural 12
4.3 Geología del subsuelo 12
5. HIDROGEOLOGÍA 14
5.1 Tipo de acuífero 14
5.2 Parámetros hidráulicos 14
5.3 Piezometría 14
5.4 Comportamiento hidráulico 14
5.4.1 Profundidad al nivel estático 14
5.4.2 Elevación del nivel estático 15
5.4.3 Evolución del nivel estático 16
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 17
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 19
7.1 Entradas 19
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 20
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 20
7.2 Salidas 22
7.2.1 Extracción por bombeo (B) 22
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 22
7.2.3 Evapotranspiración (ETR) 23
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 24
8. DISPONIBILIDAD 25
8.1 Recarga total media anual (R) 26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 27
9. BIBLIOGRAFÍA 28

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 Playa Azul, definido con la clave 1618 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sur del estado de Michoacán, cubriendo una superficie de 2,361 km^2, entre las coordenadas 17° 58' y 18° 35' de latitud norte y los meridianos 102° 14' y 102° 46' de longitud oeste. Colinda al norte y este con el acuífero Lázaro Cárdenas, al oeste con Ostula y al sur está delimitado por la línea de costa del Océano Pacífico (figura 1).

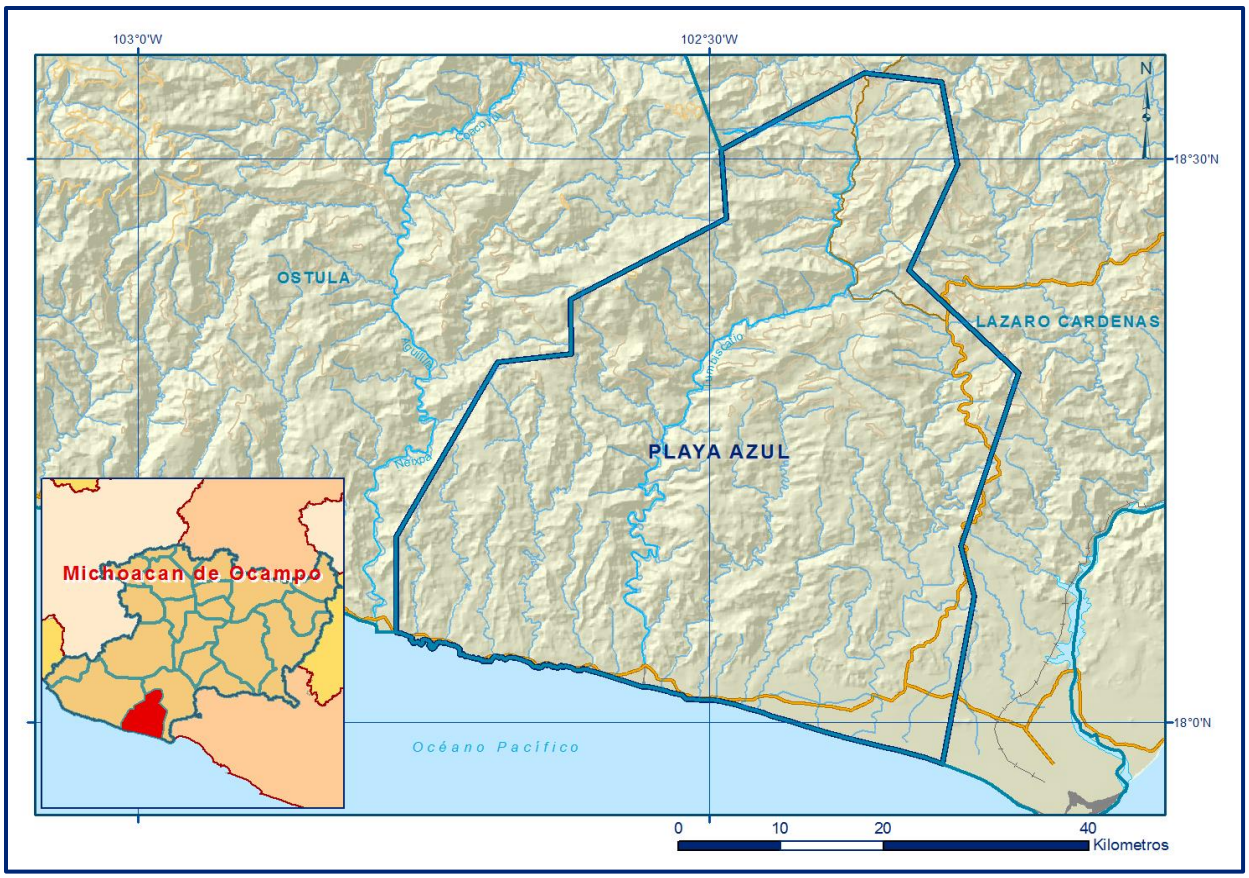


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero comprende parcialmente los municipios de Arteaga, Tumbiscatío y Lázaro Cárdenas. 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 1618 PLAYA AZUL							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	21	50.3	18	34	33.8	
2	102	17	46.9	18	34	5.3	
3	102	16	58.6	18	29	40.7	
4	102	19	32.0	18	24	3.4	
5	102	13	45.1	18	18	34.7	
6	102	16	47.8	18	9	22.4	
7	102	16	4.4	18	6	43.2	
8	102	17	45.7	17	57	45.4	DEL 8 AL 9 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
9	102	46	26.8	18	4	46.1	
10	102	46	26.3	18	9	54.0	
11	102	41	6.5	18	19	9.3	
12	102	37	16.0	18	19	36.9	
13	102	37	17.7	18	22	29.7	
14	102	29	7.7	18	26	48.9	
15	102	29	22.4	18	30	27.5	
1	102	21	50.3	18	34	33.8	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Lázaro Cárdenas, pertenece al Organismo de Cuenca "Balsas" y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Michoacán. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero cubre casi todo el acuífero: *"Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona."*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 27 de junio de 1975.

El otro decreto de veda rige en una pequeña porción al sur del acuífero y *"declara de utilidad pública es establecimiento del Distrito de Riego José María Morelos, en terrenos ubicados en los Estados de Michoacán y Guerrero, así como la construcción de las obras que lo integren y la adquisición de los terrenos necesarios para construirlas y operarlas"*; publicado en el Diario Oficial de la Federación el 3 de abril de 1973. Ambos decretos son de tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

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

El usuario principal del agua subterránea es el público urbano, el cual compite en magnitud con el uso industrial. En la porción sur del acuífero se localiza el Distrito de Riego 098 José María Morelos, a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los estudios realizados en la zona son escasos. A continuación, se hace mención de los realizados en el acuífero:

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2007. Estudio de Actualización de mediciones piezométricas en las unidades hidrogeológicas de: Tacámbaro-Turicato, La Huacana, Lázaro Cárdenas y Playa Azul, del estado de Michoacán. Elaborado por la empresa Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S.C (SIIMA, S. C). En este estudio, se visitaron 15 aprovechamientos correspondientes a dos pozos y 13 norias en el acuífero Playa Azul, los cuales se concentran en la zona costera del acuífero.

Señalan que las profundidades al nivel estático varían de 2.0 a 5.0 m, mientras que la elevación varía de -2.0 hasta 33.0 msnm. Se indican valores de profundidad al nivel estático hasta los 18 m.

En cuanto a la calidad del agua subterránea, de acuerdo a las concentraciones de STD, el agua se considera de buena calidad ya que en ninguno de los casos se rebasa los valores establecidos por la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano (1000 mg/l).

Concluye que la explotación de agua subterránea se limita a los subálveos y zonas de valles encañonados, que es donde existen materiales permeables; en el resto de la zona la explotación se dificulta, tanto por lo abrupto de la topografía como por la baja permeabilidad de los materiales.

Para el caso del acuífero Playa azul, los aprovechamientos se concentran en la zona costera. Recomienda la continuación de la actualización piezométrica de los acuíferos, realizando mediciones cada dos o tres años, tomando en cuenta pozos piloto, además de la nivelación de brocales para obtener la cota precisa de los aprovechamientos referida al nivel medio del mar.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2009. Actualización hidrogeológica de los acuíferos Lagunillas-Pátzcuaro, Ostula, Lázaro Cárdenas y Playa Azul, estado de Michoacán. Realizado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S.A. de C.V. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua para contar con información necesaria 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 platear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que se analizan y discuten en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas del INEGI (1997), el acuífero se ubica dentro de la Provincia de la Sierra Madre del Sur. La zona sur del acuífero forma parte de la subprovincia fisiográfica Costas del Sur, en tanto que las porciones centro y norte pertenecen a la subprovincia Cordillera Costera del Sur.

El conjunto de sierras que integran la Subprovincia de la Cordillera Costera del Sur se extiende fundamentalmente a lo largo de las costas Michoacanas, Guerrerenses y Oaxaqueñas. El paisaje que la identifica corresponde a una angosta llanura costera, que inicia en el lindero entre Michoacán y Colima, continúa por Guerrero y llega finalmente a Salina Cruz, Oaxaca.

3.2 Clima

De acuerdo con clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en la zona es el tipo cálido subhúmedo y semicálido subhúmedo con algunas variantes.

Se presenta en la región costera, central y en una pequeña franja del norte del acuífero; es de tipo Awo y Aw1 que son cálidos subhúmedos; en tanto que hacia las zonas más altas ubicadas al norte del acuífero el clima vuelve a cambiar a un tipo (A)C(w1) y (A)C(w2) que son semicálidos subhúmedos del grupo C.

Para el análisis climatológico se utilizó la información de las estaciones climatológicas 16013 Caleta de Campos y 16151 Arteaga (CFE), que cuentan con registro para el periodo 1961-1984 y 1957-2000, respectivamente.

De acuerdo con estos datos, la temperatura media anual en la zona costera del acuífero es de 27.3° C, los meses más calurosos se presentan de mayo a octubre. Hacia la parte alta del acuífero la temperatura media es de 22.4 ° C.

De igual manera, la precipitación media anual para la región costera es de 1,146.4 mm/año. El periodo de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con un promedio de 215.4 mm/mes, sin embargo, se presentan 7 largos meses de bajas precipitaciones y en algunos no se presentan lluvias.

El periodo de estiaje se presenta de los meses de octubre a mayo con una lámina promedio de 17.5 mm/mes.

En cuanto al valor de la evaporación potencial, su promedio anual es de 1557.5 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 17 “Costa de Michoacán”, la cual se encuentra ubicada totalmente dentro de la entidad y comprende las corrientes que están situadas entre los ríos Coahuayana y Mezcala que desembocan al Océano Pacífico. Pertenece a la Cuenca Hidrológica Río Nexpe y otros.

Dentro de los límites del acuífero se presentan varias corrientes de agua tanto intermitente como perenne. Uno de los ríos más importantes es el Toscano, que inicia su recorrido en la zona serrana, a la altura del poblado Tumbiscatío a partir de donde confluyen a él varias corrientes por su margen derecha, siguiendo una dirección hacia la costa, hasta su desembocadura en el poblado Chuta.

3.4 Geomorfología

Se distinguen 2 unidades geomorfológicas, El Valle Costero y La Sierra. El Valle tiene forma plana con ligera pendiente al mar, de dimensiones reducidas y drenaje denso de carácter intermitente; en la sierra las direcciones predominantes del drenaje son perpendiculares entre sí y paralelo en los valles.

4. GEOLOGÍA

En el área del acuífero aflora una secuencia de rocas vulcanosedimentarias mesozoicas que se encuentra intrusionada por diques y cuerpos hipabisales de la Formación Playitas.

La relación estratigráfica probable de las rocas se expresa de la siguiente manera: Rocas cenozoicas volcánicas y sedimentarias y los depósitos cuaternarios que las cubren parcialmente y de manera aislada.

La secuencia mesozoica vulcanosedimentaria es compleja y es la que presenta mayor área de exposición; está formada por aglomerados y derrames andesítico basálticos.

Las rocas aglomeráticas tienen clastos de 1 a 3 cm de diámetro (ocasionalmente mayores). En este tipo litológico también se incluyen las brechas de derrames de la Formación Zihuatanejo Ki(Cz).

Las rocas cenozoicas son las menos abundantes y, por su edad y características litológicas, se tienen los siguientes tipos: rocas paleógenas - neógenas piro y epiclásticas, las cuales están constituidas por dos cuerpos tabulares de tobas líticas riodacíticas, que se encuentran en discordancia angular con las areniscas rojas mesozoicas contiguas, con las cuales se encuentran también en contacto por medio de una falla de dirección N-S, como se observa en las localidades El Zapote, Punta del Agua, El Ranchito, La Entrada del Colomo y La Mira. Por sus relaciones de campo, se les asignó una edad postcretácica temprana, muy probablemente Paleógeno-Neógeno, Grupo La Mira Ti(ar-cg).

Los sedimentos y depósitos cuaternarios incluyen aluviones, suelos y arenas de playa. Los aluviones están confinados al cauce de los ríos y al fondo de los arroyos y cañadas, principalmente en las siguientes localidades: al oeste de la zona costera del acuífero, específicamente en Boca Seca y Chuquiapan, en la parte central, en las localidades de La Palma y Los Jiotes, y al este en La Atarjea, Cuaternario Clástico Continental Q(al).

La secuencia vulcanosedimentaria está intrusionada por diques, mantos y troncos. Los diques son andesíticos, como se puede observar muy cerca de las localidades Los Varales, La Golondrina, Los Ranchitos, El Casco, La Parotera y El Chinillo, ubicados en la parte central del acuífero, en las localidades El Jazmín, Las Huertitas, La Barranca del Caballo, Santa Bárbara y El Solitario, localizadas al oeste del acuífero.

Los diques emplazados en las tobas inclinadas muestran deformación, como evidencia de un evento de deformación posterior al que inclinó a las tobas. Afloran además otros tres cuerpos, probablemente hipabisales, constituidos por andesita basáltica finamente cristalina.

Las observaciones mencionadas sugieren una edad mesozoica para estas intrusiones, Rocas intrusivas K(Gr-Gd), T(Gr).

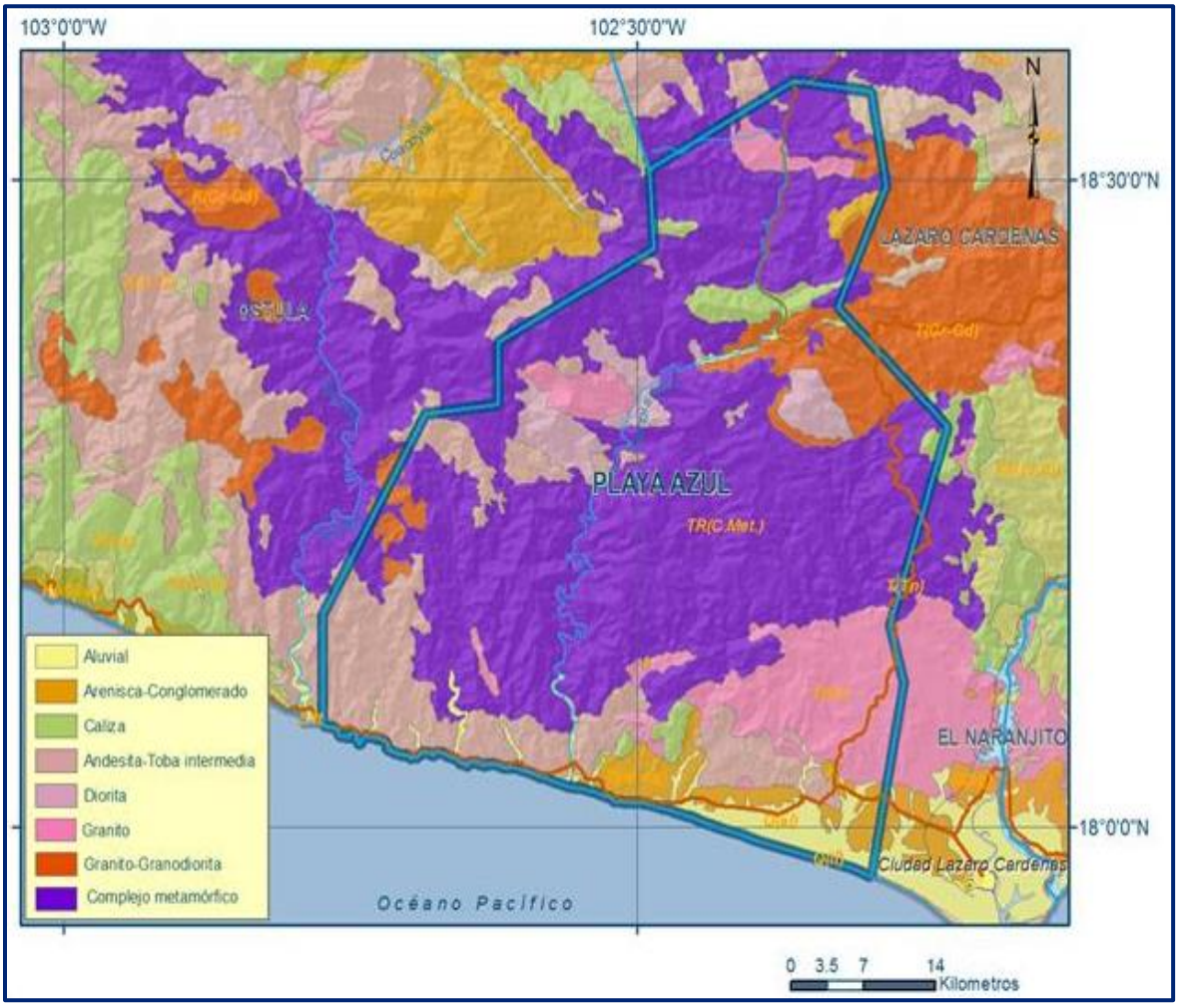


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la región que cubre el acuífero afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias cuyo registro estratigráfico comprende del Triásico al Reciente (figura 2). A continuación, se describen las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente:

Complejo Tumbiscatío-Arteaga TR (Complejo Metamórfico)

Consiste en dos miembros principales: los esquistos Arteaga y La Formación Varales. El complejo Tumbiscatío-Arteaga consiste en una alternancia de rocas volcánicas submarinas con abundantes pelíticos metamorfoseados a facies de esquistos verdes, lutitas, areniscas de grano fino, grauvacas, algunos paquetes delgados de pedernal, lavas almohadilladas, capas delgadas de calizas alternadas con tobas y cuerpos graníticos y dioríticos foliados.

La secuencia de sedimentos terrígenos es denominada informalmente como Formación Varales y es la unidad de mayor exposición en el complejo Tumbiscatío-Arteaga.

En el área de El Ahijadero, este conjunto se caracteriza por afloramientos con intercalaciones de esquistos de clorita y micáceos, con pizarras y filitas que contienen abundantes lentes y cuerpos de cuarzo segregados con estructura de boudinage.

Formación Playitas

Al oeste de Playa Azul se localiza una secuencia vulcanosedimentaria transicional predominante continental, con huellas de dinosaurios (Ferrusquía Villafranca y colaboradores, 1978) que indica una edad del Jurasico Tardío-Cretácico Temprano.

Está constituida por limolitas, areniscas y areniscas conglomeráticas de color rojo, interestratificadas con tobas y derrames andesíticos. Estas rocas se originaron en un ambiente de litoral en un mar somero.

Formación Zihuatanejo-Coalcomán Ki(Cz)

Sobreyaciendo discordantemente al complejo metamórfico, se ha observado un grupo extenso de rocas constituido por varias formaciones o secuencias volcanosedimentarias, que se extiende desde el suroeste de Guerrero hasta la localidad de Pihuamo, Jalisco.

Está constituido por rocas volcánicas andesíticas submarinas, basaltos almohadillados interestratificados con capas de limolita, conglomerado volcánico y caliza subarrecifal con microfauna del Albiano.

La secuencia varía en diversos lugares de una facies predominante volcanoclástica a una facies vulcanosedimentaria, con predominancia detrítica arcillo-arenosa. En general, esta formación está constituida por a interestratificaciones de tobas, areniscas y aglomerados con derrames andesíticos e intercalaciones esporádicas de limolitas y lutitas. Se le ha asignado una edad del Barremiano-Aptiano.

Grupo La Mira Ti(ar-cg)

Las rocas que conforman esta unidad clástica se reconocen en las partes central y noroccidental del estado y en pequeñas y aisladas localidades de la zona costera. Se trata de una alternancia de limolitas y areniscas de origen lacustre, con esporádicos depósitos de diatomita. Hacia la zona costera del estado, se han reconocido afloramientos de conglomerados con interestratificaciones de arenisca, que han recibido el nombre informal de Grupo La Mira, que afloran en las cercanías del poblado del mismo nombre.

Aunque no existen dataciones de esta unidad clástica, por correlación tectonoestratigráfica, se le considera del Mioceno-Plioceno.

Cuaternario Clástico Continental Q(al)

Está formado por depósitos detríticos recientes de origen aluvial derivados, en su gran mayoría, de la erosión de rocas volcánicas.

Rocas intrusivas (Granito-Granodiorita) K(Gr-Gd), T(Gr)

Las rocas intrusivas en Michoacán se encuentran abundantemente distribuidas en el sur de la entidad, agrupándose en términos generales en dos regiones principales; la región costera y la región de La Huacana-Huetamo.

En la región costera, las rocas intrusivas son por lo general de composición granodiorítica, con variaciones a granito calcoalcalino, cuarzodiorita y, en menor cantidad, diorita. La edad predominante de estos intrusivos se estima de finales del Mesozoico a principios del Paleógeno.

4.2 Geología estructural

De acuerdo con el marco tectónico regional, las rocas han sido sometidas a esfuerzos de compresión, tensión y gravitación, producto de las cuatro fases tectónicas actuantes desde el Mesozoico hasta el Cuaternario.

En la región norte del acuífero se presenta un sistema de fallas normales con dirección preferencial NE-SW específicamente en los poblados La Sidra, Las Juntas, La Mesa de Estrada y Pueblo Viejo; intersectadas por un segundo sistema de fallas normales con dirección E-W; este sistema de fallas se puede observar muy cerca de las localidades Las Enramadas, Paredones La Cuchilla y El Agustín. Ambos sistemas de fallas se formaron en el complejo metamórfico.

La secuencia vulcanosedimentaria está afectada por dos sistemas de fallas y fracturas que controlan el drenaje y cuyas direcciones dominantes, perpendiculares entre sí, son NNW-SSE y WNW-SSE. Este sistema de fallas se puede observar desde las localidades de La Habillera, El Solitario, Los Canales, Cerro de Chucutitan y Punto del Agua, hasta Santa Clara, El Colorado y Palma Sola. Las intrusiones están claramente asociadas a sistemas de fallas, esto se evidencia más claramente en las cercanías de los poblados El Pinzón, El Zapote del Perro, El Ahijadero y El Tamarindo.

Por otro lado, la deformación de los diques parece evidenciar un evento tectónico adicional.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales que constituyen el cauce de los arroyos y la planicie costera; y en su porción inferior por conglomerados, rocas sedimentarias e ígneas fracturadas.

El espesor del medio granular varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, aumentando en las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, hasta algunas decenas de metros en la planicie costera.

El medio fracturado está asociado a la zona de alteración de las rocas intrusivas principalmente y a la presencia de fracturamiento en rocas sedimentarias; su espesor varía, de unos cuantos metros hasta alcanzar 40 m en promedio (figura 3).

El basamento hidrogeológico y las fronteras al flujo subterráneo están constituidos las rocas metamórficas y graníticas. El basamento es irregular y se encuentra afectado por tectonismo (fallamiento normal) deformación de los estratos calcáreos e intrusión granítica. Con base en las características físicas de las unidades litológicas y a su comportamiento en el subsuelo se pueden identificar 3 unidades hidrogeológicas, las cuales se describen a continuación:

Unidad I: material no consolidado con posibilidades altas. Comprende sedimentos aluviales no consolidados compuestos principalmente de gravas y arenas. Estos depósitos bien clasificados, tienen rangos de porosidad entre 25–50%. Esta es la unidad que actualmente se explota.

Unidad II: Material consolidado con posibilidades medias. Formada por areniscas-conglomerado y por rocas volcánicas de composición intermedia. Con base en el reconocimiento de campo y el estudio petrográfico de las rocas, se observa fracturamiento moderado y porosidad media. Su porosidad secundaria se correlaciona con los valores de porosidad para basaltos fracturados de 5 -50% y permeabilidad entre 10-6 – 10-2 cm/s.

Unidad III: Material consolidado con posibilidades bajas.

Esta unidad incluye al granito, a las andesitas, dacitas y rocas metasedimentarias, las cuales muestran fracturamiento escaso y valores bajos de conductividad hidráulica que retardan el movimiento del agua subterránea. Su porosidad es casi nula.

En la figura 3, se esquematiza una sección geológica de la zona del acuífero con una dirección NE-SW, la cual corta el granito que subyace a la Andesita-Toba intermedia, dicha unidad se encuentra coronada en gran proporción por arenisca-conglomerado. Los sedimentos aluviales sobreyacen a estas dos unidades.

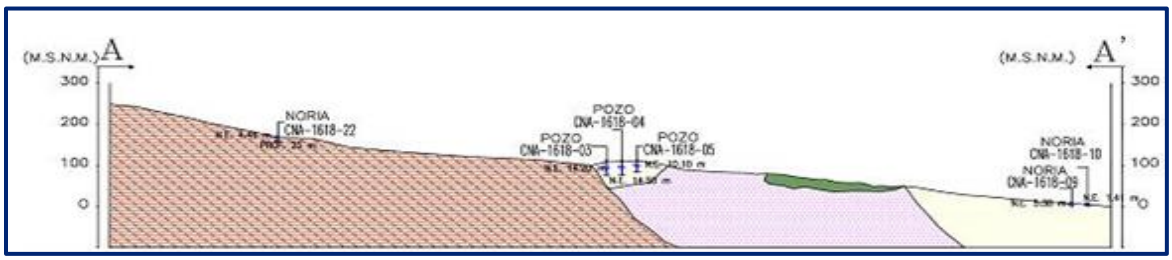


Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero presenta condiciones hidráulicas de **tipo libre**, heterogéneo, emplazado en sedimentos aluviales derivados de la erosión de las rocas volcánicas principalmente. Esta es la unidad que actualmente se explota; sin embargo, las rocas sedimentarias (calizas y areniscas) y volcánicas (tobas y andesitas) conforman otra unidad que con permeabilidad secundaria que aún no ha sido explorada.

El acuífero tiene reducidas dimensiones y baja capacidad de almacenamiento, con permeabilidad media a alta. El área de explotación abarca una extensión de 83 km^2 de la zona costera, entre los poblados Parotilla, La Mira y El Colomo, al oriente entre Buenos Aires y el Bordonal y al occidente a la altura del poblado Las Peñas.

5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los datos obtenidos de la interpretación de dos pruebas de bombeo, realizadas como parte de las actividades del estudio de 2009, la transmisividad es variable, dependiendo de la granulometría. Las pruebas fueron realizadas en la zona costera del acuífero.

Los valores varían de **6.2 a 13.4 x 10^{-3} m^2/s** para el caso de la transmisividad, y de **0.09 a 0.10** para el rendimiento específico.

5.3 Piezometría

Con respecto a la información piezométrica, se dispone de datos para los años 2007 y 2009.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En 2007 la profundidad varía entre 2 a 18 m, las menores se registran en la zona costera, desde donde se incrementan gradualmente, por efecto de la topografía, hacia las estribaciones de las sierras. El comportamiento de la profundidad para 2009 es similar a 2007 con algunas variaciones en sus valores que varían desde algunos centímetros hasta los 14 m, los valores menores se presentan en el centro de la zona de explotación, donde se ha registrado un incremento en el número de aprovechamientos. En la parte costera, los valores se incrementan desde 3 hasta 8 m. Al este, varían de 1 a 14 m. En la figura 4 se muestra la configuración de la profundidad al nivel estático para 2009.

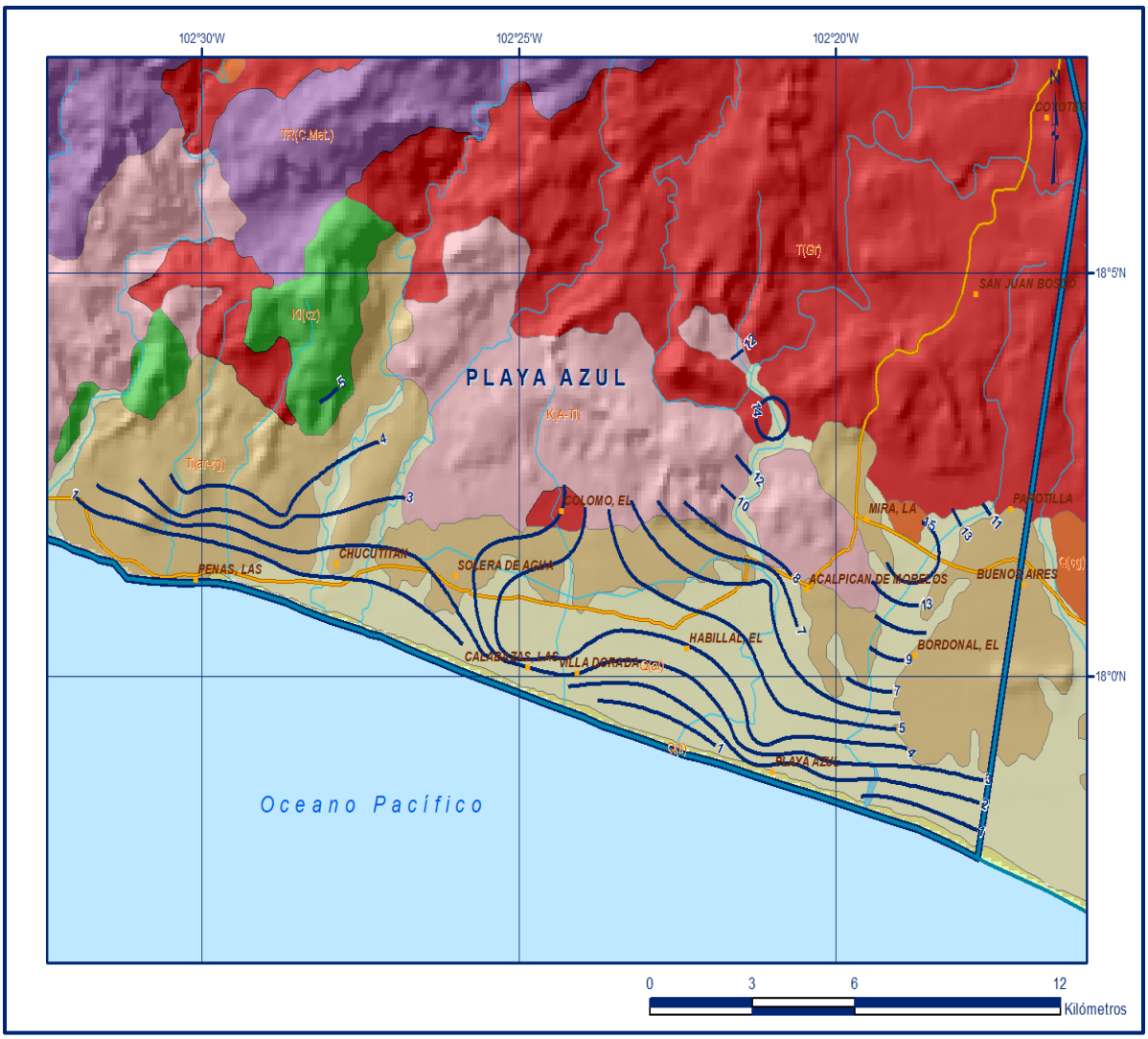


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para 2007 el flujo de agua subterránea se asemeja al hipotético flujo natural con dirección preferencial norte-sur y solo donde existe concentración de aprovechamientos se interrumpe la descarga hacia la costa, esto sucede cerca de los poblados Las Calabazas, Villa Dorada y El Habillal, con valores de 1.0 a 2.0 msnm. En la zona de explotación las elevaciones varían de 1.5 a 10 msnm.

Para 2009, la dirección preferencial del flujo subterráneo no presenta alteraciones importantes. Los valores mayores se encuentran en las estribaciones de las elevaciones topográficas. En la figura 5, se observa la tendencia del flujo subterráneo, que muestra el reflejo de la topografía.

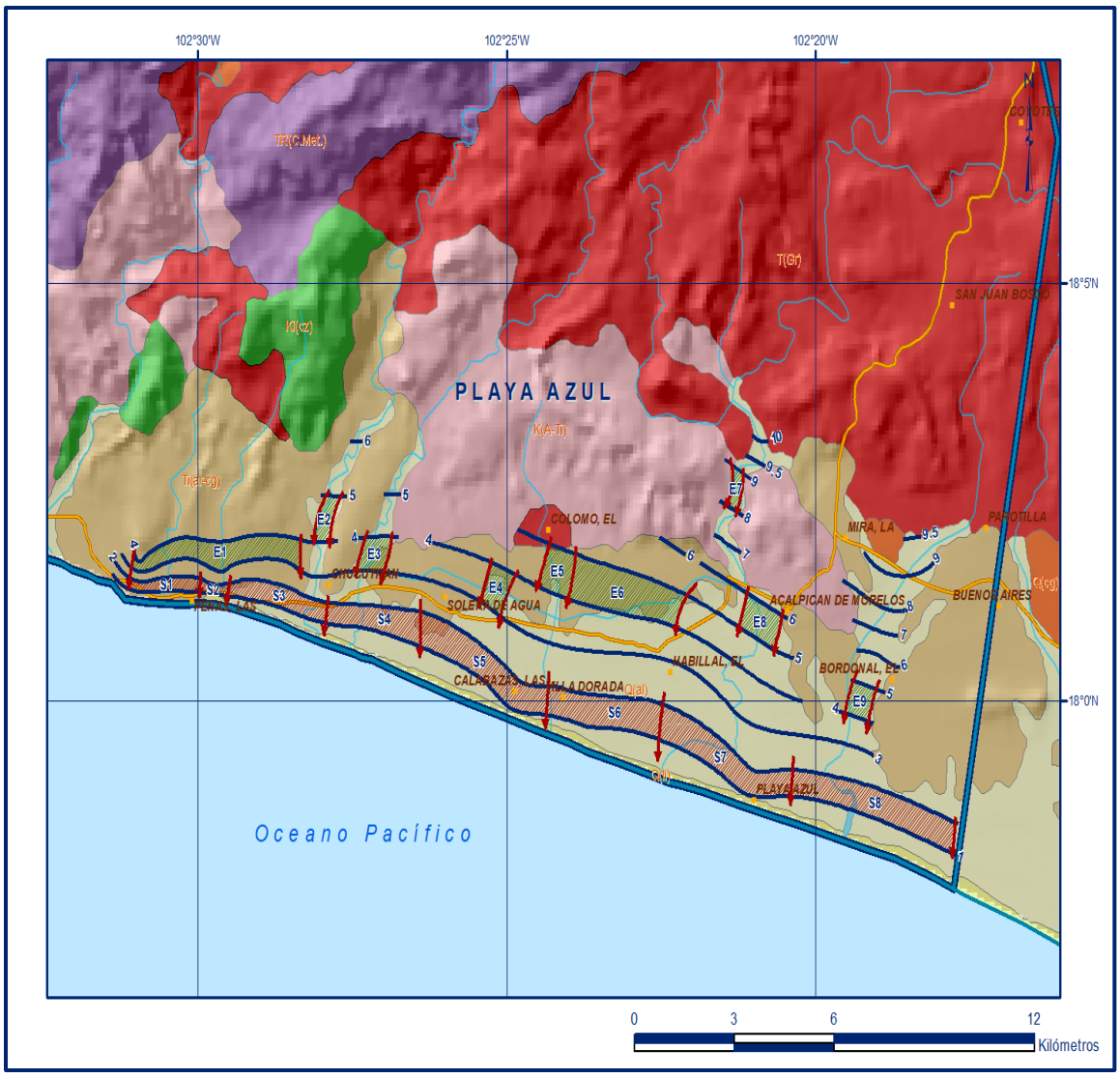


Figura 5. Elevación del nivel estático msnm (2009)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, la figura 6 presenta la configuración para el periodo 2007-2009. En ella se observa que se registran valores puntuales tanto de abatimiento como de recuperación.

Las recuperaciones alcanzan los 0.7 m anuales en las inmediaciones de El Habillal, en tanto que los abatimientos varían de 0.5 a 0.9 m anuales, en los poblados Acalpican de Morelos y Chuquiapan. En la superficie restante que cubre el acuífero no se presentan variaciones importantes en la posición de los niveles del agua subterránea.

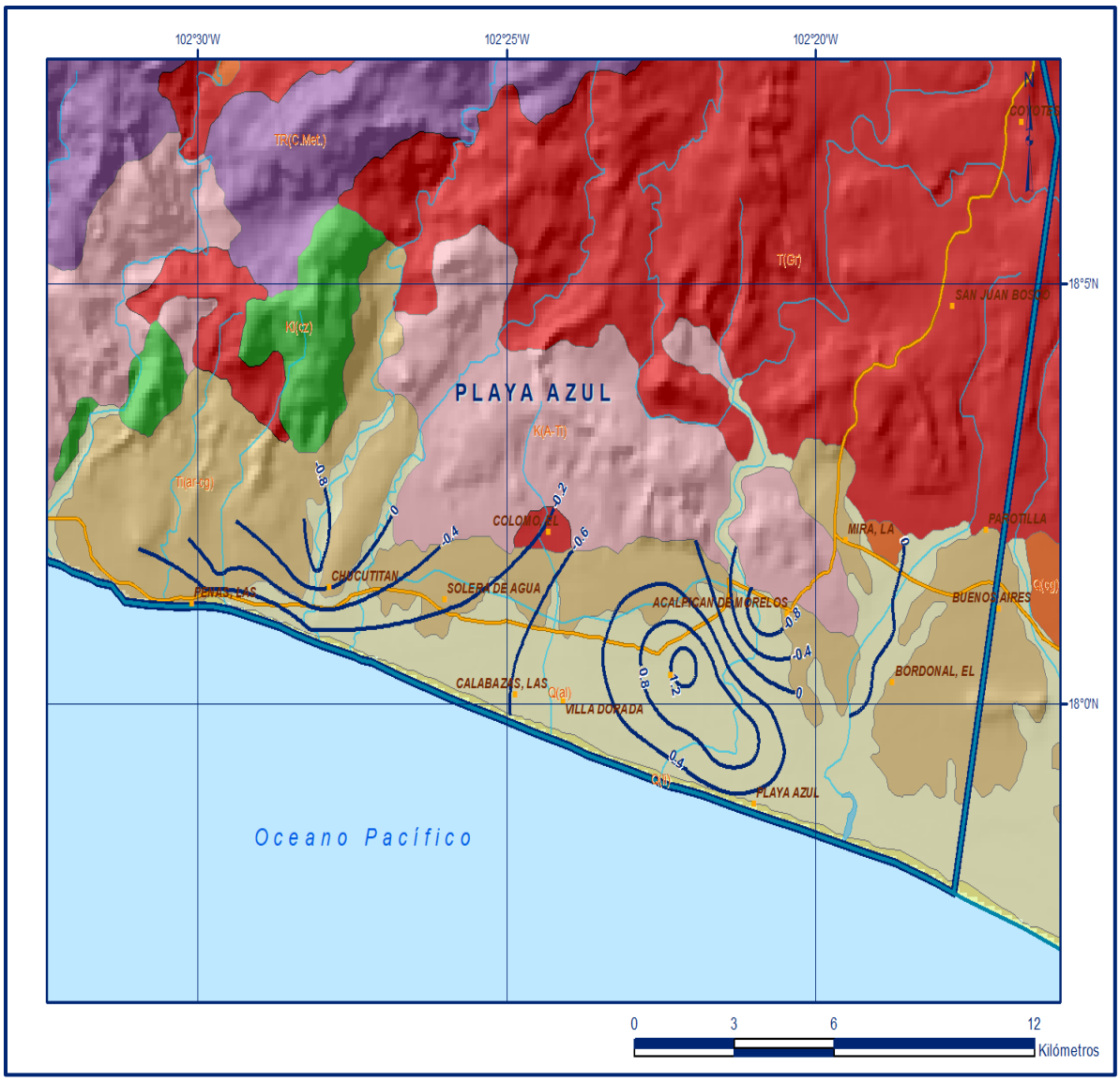


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2009)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2009, se tomaron muestras en 5 aprovechamientos, distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron tres grupos de parámetros organolépticos, fisicoquímicos y bacteriológicos: iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos y de contaminación, y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Las condiciones hidrogeológicas y topográficas tienen una influencia directa en la distribución espacial de las concentraciones de los diferentes parámetros químicos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 316 a 882 ppm.

Las menores concentraciones, de 316 a 360 ppm, se registran en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, aumentando hacia este y sur.

Las familias de agua predominantes son la bicarbonatada-mixta y sulfatada cálcica, esta última representa agua de reciente infiltración. De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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. Sin embargo, tres aprovechamientos registraron concentraciones altas de coliformes fecales y totales.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para determinar la calidad del agua para uso agrícola, los resultados indican que en el acuífero se presentan dos clases de agua, la primera es C2S1 que se presenta en 4 muestras, que representa agua de salinidad media (C2) con bajo contenido de sodio (S1); y C3S1 en la otra muestra que indica el incremento en la salinidad del agua, pero sin incremento de sodio intercambiable.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2009, se registraron| un total de 41 aprovechamientos, de los cuales 38 corresponden a norias y 3 a pozos. Del total de aprovechamientos, 38 están activos y los restantes 3 inactivos. Del total de obras, 16 para dotación de agua potable, 14 para doméstico, 6 para servicios, 3 más para uso industrial y los 2 restantes para uso agrícola.

El volumen de extracción estimado asciende a **8.4 hm^3/año**, de los cuales 4.2 hm^3 (50%) se utilizan para dotación de agua potable a la población de las comunidades de la región, 0.03 más (0.4%) para uso doméstico, 4.1 hm^3 anuales (48.8%) para uso

industrial, 0.03 hm^3 anuales (0.4%) para servicios y los 0.03 hm^3 anuales (0.4%) restantes para uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el período 2007-2009, en un área de 83 km^2, en la que están dispersos los aprovechamientos. 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 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:

Recarga total	**-**	**Descarga total**	**=**	**Cambio de almacenamiento**

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas (Rpu), constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Sin embargo, la información de las superficies y láminas de riego para estimar la recarga inducida que se produce en la zona agrícola que se abastece de agua superficial del Río Balsas, es escaza y el distrito de riego no opera regularmente.

Adicionalmente, se desconoce la eficiencia del sistema de distribución de agua potable. Por lo que, para fines del balance, se considera nula.

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 definida por la expresión:

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

Donde:
Eh= Entrada por flujo subterráneo horizontal;
Rv= Recarga vertical;
B= Bombeo;
Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;
ETR= Evapotranspiración;
ΔV(S)= Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

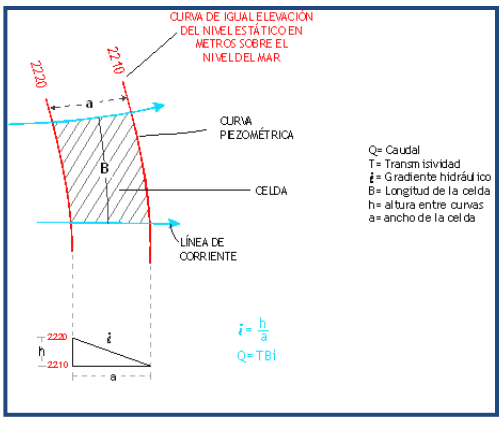
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio 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.

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, a partir de las configuraciones de elevación del nivel estático para los años 2007 y 2009, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$



Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m^2/s)

La principal zona de entrada se ubica al este del acuífero, entre los poblados Acalpican de Morelos y El Bordonal, el volumen promedio anual es de **1.4 hm^3/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2007)

CELDA	T (10^{-3} m^2/s)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 /s)	VOL. ANUAL (hm^3)
E_1	0.575	4847	0.0027	0.007	0.2
E_2	5.596	425	0.0009	0.002	0.1
E_3	5.596	402	0.0011	0.002	0.1
E_4	5.596	682	0.0015	0.006	0.2
E_5	5.596	766	0.0010	0.004	0.1
E_6	0.575	3395	0.0013	0.002	0.1
E_7	5.596	250	0.0011	0.001	0.0
E_8	6.715	1075	0.0017	0.012	0.4
E_9	11.192	655	0.0015	0.011	0.3
				Total	**1.5**

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo para el año 2009

CELDA	T (10^{-3} m^2/s)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 /s)	VOL. ANUAL (hm^3)
E_1	0.575	4993	0.002	0.005	0.2
E_2	5.596	400	0.001	0.002	0.1
E_3	5.596	705	0.001	0.004	0.1
E_4	5.596	685	0.001	0.004	0.1
E_5	5.596	815	0.001	0.004	0.1
E_6	0.575	3225	0.001	0.002	0.1
E_7	0.575	255	0.001	0.000	0.0
E_8	5.596	1080	0.001	0.006	0.2
E_9	11.192	645	0.001	0.007	0.2
				Total	**1.2**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por evapotranspiración (ETR), bombeo (B) y las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar (Sh).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **8.4 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera como se evaluaron las entradas, a partir de las configuraciones de elevación del nivel estático de los años 2007 y 2009, mostradas en las figuras 6 y 7.

Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación, a lo largo de la línea costera. En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados del cálculo.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2007)

CELDA	T (10^{-3} m^2/s)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 /s)	VOL. ANUAL (hm^3)
S_1	2.1	2590	0.0039	0.021	0.7
S_2	2.1	815	0.0035	0.006	0.2
S_3	2.1	2875	0.0030	0.018	0.6
S_4	2.1	2705	0.0018	0.010	0.3
S_5	2.1	4030	0.0015	0.013	0.4
S_6	2.1	3430	0.0011	0.008	0.2
S_7	2.1	4590	0.0011	0.010	0.3
S_8	2.1	4880	0.0014	0.014	0.5
Total					3.2

Tabla 5. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2009)

CELDA	T (10^{-3} m^2/s)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3 /s)	VOL. ANUAL (hm^3)
S_1	2.1	2600	0.004	0.022	0.7
S_2	2.1	815	0.003	0.005	0.2
S_3	2.1	2850	0.003	0.018	0.6
S_4	2.1	2710	0.002	0.011	0.4
S_5	2.1	4065	0.001	0.008	0.3
S_6	2.1	3265	0.001	0.007	0.2
S_7	2.1	4085	0.001	0.009	0.3
S_8	2.1	4870	0.002	0.020	0.6
Total					3.3

El valor promedio para el periodo 2007-2009 asciende a 3.3 hm3 anuales.

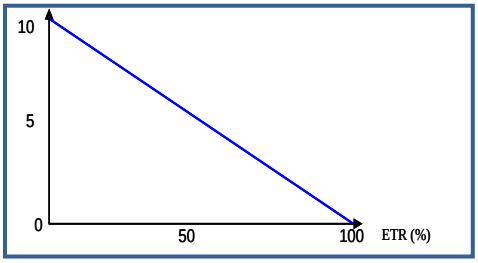
7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real. El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 27.3° C y precipitación= 1146.4 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 1034.3 mm.

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

T (°C) =	27.3		
P(mm) =	1146.4	P^2 =	1314232.96
L =	1999.82085	L^2 =	3999283.43
ETR (mm)	1034.3		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Para realizar una estimación más real del valor de la evapotranspiración, se tomará en cuenta únicamente la evapotranspiración del agua freática que se produce durante los meses de estiaje que es cuando el agua se transfiere del subsuelo a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración, y durante el periodo de lluvias, el agua susceptible de evapotranspirarse es la que queda almacenada en la superficie, sobre todo en depresiones del terreno, antes de infiltrarse al subsuelo.

De esta manera, considerando que el periodo de lluvias se presenta en 4 meses, de junio a septiembre, el periodo de estiaje representa el 67 % del año, dicho factor se aplicará a la lámina de ETR obtenida por el método de Turc.

ETR = (1.0343 m) (0.67) = 0.693 m

En el área de balance existe una superficie de 51 y 45 km^2, respectivamente para los años 2007 y 2009, de la zona costera donde se presentan niveles freáticos someros. Si tomamos en cuenta el 67 % de la lámina de ETR (693 mm) y la profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 3 m, de acuerdo con la gráfica anterior.

ETR2007 = 51 km2 (0.693 m) (0.7) = 24.7
ETR2009 = 45 km2 (0.693 m) (0.7) = 21.8

Por lo tanto, el valor promedio es **ETR = 23.3 hm^3/año.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático 2007-2009 y considerando un coeficiente de almacenamiento de 0.07, obtenido como promedio en el acuífero y adoptado por correlación hidrogeológica, se determinó la variación del almacenamiento con la siguiente expresión:

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

Donde:
ΔV(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 (km^2);
h= Valor medio de la variación piezométrica en el período (m);

En el acuífero se manifiesta un cambio de almacenamiento de -12.5 hm^3 para el periodo 2007-2009, con abatimiento promedio de 0.15 m anuales. Por lo que ΔV(S) = **- 0.9 hm^3/año.**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes que intervienen en la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical, despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$Rv = B + Sh + ETR \pm \Delta V(S) - Eh$$
$$Rv = 8.4 + 3.3 + 23.3 - 0.9 - 1.4$$
$$Rv = 32.7\ hm^3/año$$

En este valor se incluye la recarga que se produce a lo largo de los ríos y arroyos y la recarga inducida. De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas.

$$R = Rv + Eh$$
$$R = 32.7 + 1.4$$
$$R = 34.1\ hm^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	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 este caso, su valor es de **34.1 hm³/año,** todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera un volumen de descarga natural comprometida de **19.6 hm³ anuales,** que corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y al 70 % de la evapotranspiración que deben preservarse para proteger la flora ribereña y el ecosistema costero del humedal RAMSAR denominado “Laguna Costera El Caimán.

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 **6,724,039 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.

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$

$$\mathbf{DMA = 34.1 - 19.6 - 6.724039}$$

$$\mathbf{DMA = 7.775961\ hm^3/año.}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **7,775,961 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Estudio de Actualización de Mediciones Piezométricas en las Unidades Hidrogeológicas de: Tacámbaro-Turicato, La Huacana, Lázaro Cárdenas y Playa Azul, estado de Michoacán. Realizado por la empresa Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S.C.