

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO OSTULA (1619), ESTADO DE
MICHOACÁN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	3
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.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo.....	12
5. HIDROGEOLOGÍA.....	13
5.1 Tipo de acuífero.....	13
5.2 Parámetros hidráulicos	13
5.3 Piezometría.....	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	14
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	14
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.....	17
7.1 Entradas.....	18
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	19
7.2 Salidas	20
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	20
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	21
7.2.3 Descarga por manantiales (Dm)	21
7.2.4 Evapotranspiración (ETR)	21
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	23
8. DISPONIBILIDAD	24
8.1 Recarga total media anual (R).....	25
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	25
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	25
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	26
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 Ostula, definido con la clave 1619 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la región sur del estado de Michoacán, entre las coordenadas 18° 00', y 19° 00' de latitud norte y los meridianos 102° 25' y 103° 45' de longitud oeste, abarcando una superficie de 6,574 km². Colinda al norte con los acuíferos Apatzingán y Coahuayana, al este con Lázaro Cárdenas y Playa Azul, todos ellos pertenecientes al estado de Michoacán. Al sur y oeste su límite es el Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente se ubica principalmente en los municipios Aquila y Coalcomán de Vázquez Pallares, además en porciones de Chinicuila, Aguililla, Tumbiscatío, Arteaga y Lázaro Cárdenas.



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.

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Ostula pertenece al Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Michoacán. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

El primero cubre la porción norte: “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 segundo rige en la porción sur: “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos, y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del Estado de Michoacán” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 20 de octubre de 1987. Ambos decretos son de tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1619 OSTULA							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	34	44.0	18	40	32.4	
2	103	32	23.0	18	40	27.5	
3	103	31	47.0	18	42	29.9	
4	103	27	53.8	18	43	59.8	
5	103	18	45.8	18	41	6.4	
6	103	17	28.8	18	42	27.8	
7	103	16	54.5	18	46	38.2	
8	103	12	24.8	18	48	14.6	
9	103	10	37.2	18	56	22.2	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	103	7	27.4	18	55	47.5	
11	103	2	8.4	18	57	38.0	
12	102	58	4.5	18	51	23.8	
13	102	58	43.3	18	48	10.8	
14	102	51	37.7	18	44	13.3	
15	102	32	18.0	18	42	35.2	
16	102	30	9.1	18	40	26.3	
17	102	32	22.6	18	38	29.1	
18	102	29	22.4	18	30	27.5	
19	102	29	7.7	18	26	48.9	
20	102	37	17.7	18	22	29.7	
21	102	37	16.0	18	19	36.9	
22	102	41	6.5	18	19	9.3	
23	102	46	26.3	18	9	54.0	
24	102	46	26.8	18	4	46.1	DEL 24 AL 25 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
25	103	41	12.0	18	37	50.0	
26	103	37	52.4	18	36	14.7	
1	103	34	44.0	18	40	32.4	

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El usuario principal del agua subterránea es el sector público urbano; en su superficie no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los estudios realizados en la zona son escasos. A continuación, se mencionan dos estudios hidrogeológicos de evaluación, uno realizado en acuíferos vecinos y otro que lo incluye totalmente:

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), para la comisión nacional del agua, en 2007.

En este estudio se visitaron 15 aprovechamientos correspondientes a dos pozos y 13 norias en el acuífero de Playa Azul, los cuales se concentran en la parte sur del área, sobre la zona costera del acuífero. 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.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LAGUNILLAS-PÁTZCUARO, OSTULA, LÁZARO CÁRDENAS Y PLAYA AZUL, ESTADO DE MICHOACÁN. Elaborado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S.A. de C.V., para la comisión nacional del agua, en 2009. 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 plantear 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 16112 “San Juan de Lima”, ubicada en la porción norte, 16154 “Coalcomán”, localizada en la zona serrana, y 16208 “El Chacán”, localizada en la porción costera; que cuentan con

registro para el periodo 1969-1985, 1960-1989 y 1980-2000, respectivamente. De acuerdo con los datos de dichas estaciones, la temperatura media anual en la zona costera del acuífero es de 26° C (estación San Juan de Lima), los meses más calurosos se presentan de mayo a octubre. Hacia la parte alta del acuífero la temperatura media es de 23° C (estación Coalcomán).

La precipitación media anual del acuífero en la región costera es de 1032 mm/año, considerando los valores de la estación climatológica San Juan de Lima; en esta región del acuífero el periodo de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con un promedio de 164 mm/mes.

Al noreste del acuífero en la zona serrana, la lámina media anual de precipitación es de 1397 mm/año, el periodo lluvioso se presenta en los meses de junio a octubre con un promedio de 256 mm/mes, el periodo de estiaje ocurre de noviembre a mayo con una lámina promedio de 31.75 mm/mes. En cuanto al valor de la evaporación potencial, su promedio anual es de **1526 mm/año**.

3.3 Hidrografía

El acuífero, pertenece a la Región Hidrológica 17 denominada Costa de Michoacán, la cual se encuentra ubicada totalmente dentro de la entidad. A nivel de cuenca, se encuentra dentro de las Cuencas Hidrológicas Río Nexpa y otros y Río Cachán o Coalcomán y otros.

El acuífero Ostula, cuenta con un gran número de corrientes tanto intermitentes como perennes, dos de las principales corrientes de agua son el arroyo Coalcomán y el río Nexpa; el primero nace al norte del acuífero con el nombre de arroyo Yerbabuena, aguas abajo al pasar por la localidad Maruatilla adquiere el nombre de arroyo Coalcomán y desemboca al Océano Pacífico en la localidad Cachán de Echeverría.

El Río Nexpa nace en la localidad del Varaloso donde se le conoce con el mismo nombre; en su trayectoria pasa por las poblaciones Chapula, El Naranjo, El Parotal, Totopan, finalmente culmina su trayectoria en la localidad de Nexpa, al desembocar al Océano Pacífico.

3.4 Geomorfología

Dentro de la zona 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 paralelos en los valles.

4. GEOLOGÍA

Las manifestaciones más antiguas de un magmatismo Cretácico afloran cerca del suroeste de la costa Michoacana, donde dentro de una gruesa secuencia de rocas pelíticas y calizas arrecifales se intercalan horizontes de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición andesítica y dacítica. Los conglomerados descansan sobre tobas y rocas piroclásticas moradas de composición dacítica, cuya edad posiblemente corresponda al Jurásico Tardío, Formación Zihuatanejo Ki(Cz).

La distribución de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2. En esta región la parte superior de la secuencia cretácica se encuentra coronada por aglomerados, brechas, tobas y limolitas tobáceas que son cubiertas por bancos de caliza arrecifal, Formación Tecalitlán K(A-Ti).

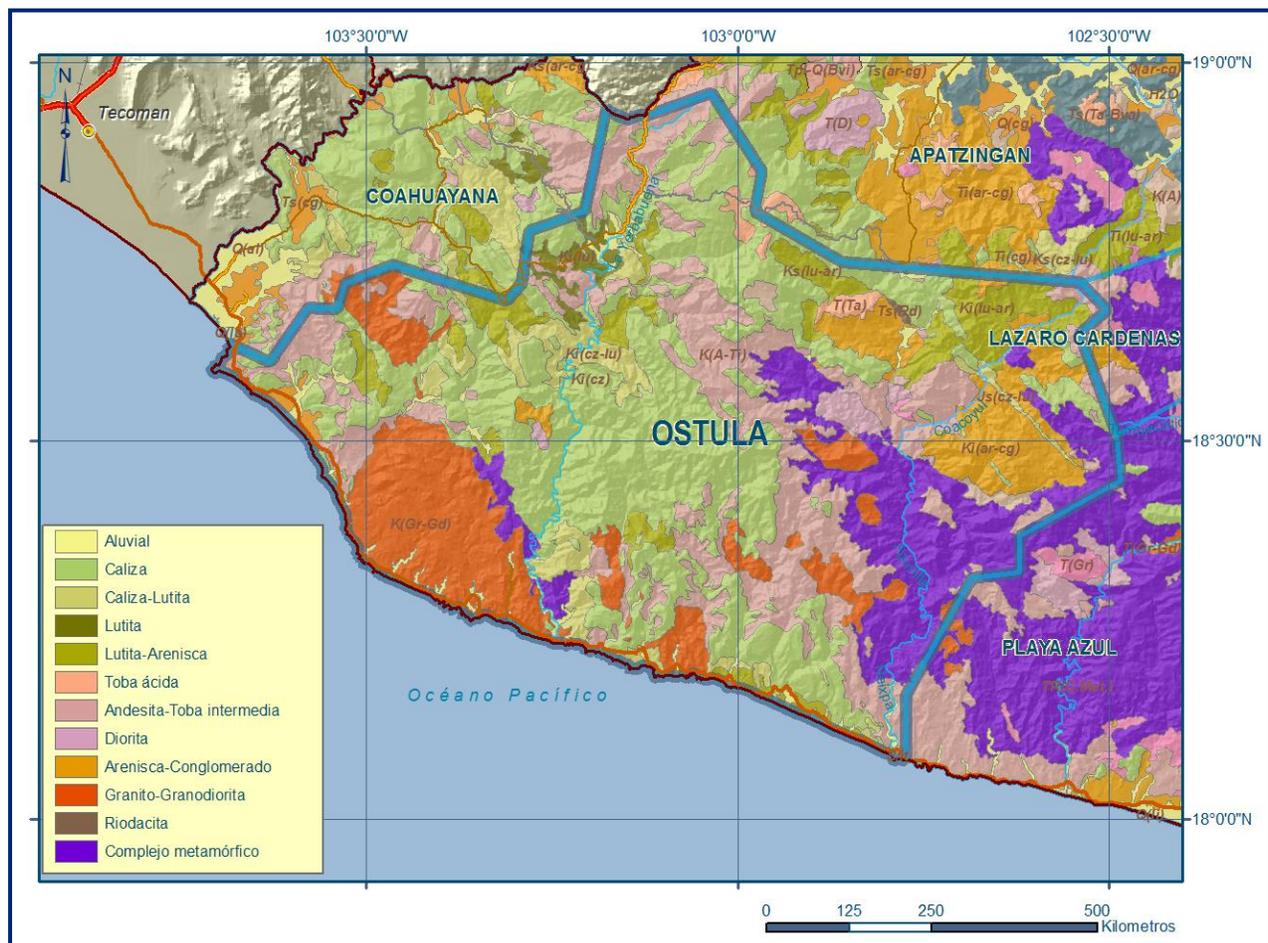


Figura 2. Geología general del acuífero

Litológicamente, comprende una serie de clásticos de origen marino que consiste de lutitas, areniscas y conglomerados de color amarillo, verde, rojo y pardo, interestratificados en menor cantidad con lavas, tobas y esporádicos lentes de pedernal, que subyacen en discordancia angular a la secuencia asignada al Cretácico Inferior.

Se localiza además una secuencia volcanosedimentaria transicional predominantemente continental 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. De acuerdo con la sección geológica (figura 3) se identifican las siguientes unidades:

El Cretácico Inferior está representado en su mayor parte por rocas sedimentarias que conforman cuatro formaciones relativamente bien estudiadas, que comprenden desde el Neocomiano al Albiano (Cretácico Inferior), constituidas principalmente por distintos tipos de rocas detríticas y calizas con esporádicas intercalaciones de rocas volcánicas.

La unidad más antigua es la Formación Zihuatanejo Ki(cz-lu), del Cretácico, consiste en una secuencia rítmica de lutitas, limolitas, conglomerados, tobas en menores proporciones, areniscas e intercalaciones de calizas granulares y calcarenitas.

Existen afloramientos de bancos de caliza interestratificados con dolomitas, calcarenitas y calcilutitas. Se considera que la edad de esta formación corresponde al Albiano, sin descartar la posibilidad de que algunas de sus capas inferiores pertenezcan al Aptiano Superior

4.1 Estratigrafía

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

Complejo Tumbiscatío-Arteaga TR (C. Met.)

En el Suroeste del estado de Michoacán, el Triásico volcanosedimentario metamorfozido comprende la unidad estratigráfica conocida como complejo Tumbiscatío-Arteaga.

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 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 vulcanoclástica a una facies volcanosedimentaria, 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.

Formación Tecalitlán K (A-Ti)

Secuencia volcanosedimentaria que se distribuye en el suroeste del estado, extendiéndose principalmente hacia Colima y Jalisco (Rodríguez, 1980). En territorio michoacano, esta secuencia ha sido identificada en Arroyo Seco, en Arteaga, en las inmediaciones de Coalcomán y Villa Victoria y al oeste de Tepalcatepec, donde alcanza un espesor aproximado de 1500 m.

La distribución de esta unidad no ha sido cartografiada en detalle habiendo sido estudiada con mayor precisión en Jalisco y Colima, donde sobreyace en concordancia a la Formación Alberca y subyace en aparente concordancia a la Formación Tepalcatepec. Se le ha asignado una edad del Barremiano-Aptiano.

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, cuarzdiorita y, en menor cantidad, diorita. La edad predominante de estos intrusivos se estima de finales del Mesozoico a principios del Paleógeno.

Las localidades donde han sido mejor estudiadas son Tumbiscatío-Arteaga, Aquila, Ostula y Maruta-Punta San Telmo. Estas rocas intrusionan tanto a las rocas metamórficas del complejo Tumbiscatío-Arteaga como a las secuencias vulcanosedimentarias cretácicas que predominan al suroeste del estado.

Se han obtenido edades radiométricas de estas rocas que varían desde el Jurásico Tardío hasta el Mioceno.

4.2 Geología estructural

La zona costera se originó en los periodos geológicos del Cretácico y el Paleógeno-Neógeno. Las fallas y fracturas que se formaron se presentan en mayor número en la parte central del acuífero.

Aunque existe un número considerable de fracturas y fallas, las de mayor longitud se encuentran en la porción norte del acuífero, posiblemente ocasionadas por la actividad volcánica del área. Mediante mapeos geológicos se han podido inferir otras fracturas y fallas.

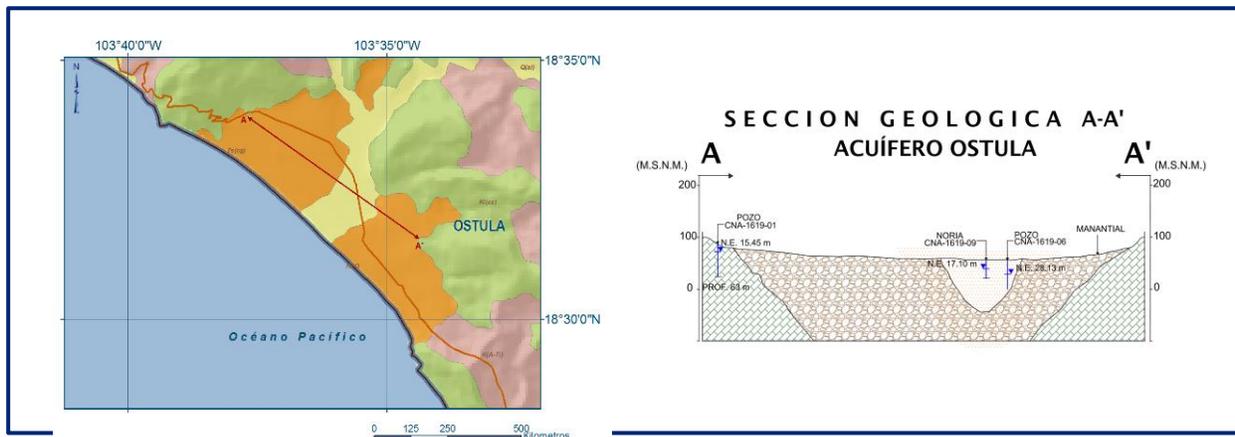
Se observan además anticlinales y sinclinales en las rocas sedimentarias de la zona costera, específicamente cerca de las localidades, Rancho La Soledad, El Mango, La Palmita de Ostula, Agua Bendita, Rancho la Valencia y el Cerro Las Ratas, originados por esfuerzos compresivos.

La costa de Ostula, se puede definir como costa irregular, prácticamente sin planicie costera debido a que las montañas y colinas de la Sierra Madre del Sur se encuentran muy cerca del mar y en algunas partes las montañas emergen abruptamente de él.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada, 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 en su porción inferior por conglomerados, areniscas y calizas, así como 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; en tanto que 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 50 m en promedio (figura 3).

Figura 3. Sección geológica esquemática



El basamento hidrogeológico y las fronteras al flujo subterráneo están constituidos por las rocas metamórficas, graníticas, así como el mismo medio fracturado cuando desaparece el fracturamiento. El basamento es irregular y se encuentra afectado por tectonismo (fallamiento normal) deformación de los estratos calcáreos e intrusión granítica.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero presenta condiciones hidráulicas de tipo libre, de naturaleza heterogénea, emplazado en sedimentos aluviales y conglomerados 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.

Para fines de evaluación, se han definido dos áreas en las que se realiza la explotación del agua subterránea: "Ostula", abarca una extensión de 13 km² y se encuentra emplazada en la zona costera, en la porción suroeste del acuífero, a la altura de los poblados Placita de Morelos y Cruz de Campos y "Coalcomán", tiene una superficie 11 km² y se localiza en el poblado Coalcomán de Vázquez Pallares, ubicado al noroeste del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los datos obtenidos de la interpretación de 3 pruebas de bombeo, realizadas como parte de las actividades del estudio de 2009, la transmisividad es variable, dependiendo de la granulometría. Los valores varían de **0.21 a 45.0 x 10⁻³ m²/s** para el caso de la transmisividad, y de **0.09 a 0.10** para el rendimiento específico.

5.3 Piezometría

No existe registro piezométrico histórico consistente debido a que no se tiene definida una red piezométrica. Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró únicamente la información recabada durante el estudio realizado en 2009.

Para el análisis de la piezometría se consideraron dos zonas principales de explotación: Ostula y Coalcomán, las cuales se describen en los siguientes apartados.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En el área de explotación, las profundidades al nivel estático, varían de 1.0 hasta 28 m, los valores mayores se presentan al norte de la localidad Placita de Morelos, dentro de la planicie costera. El flujo de agua que entra a la planicie, proviene principalmente de los escurrimientos de la zona serrana (figura 4).

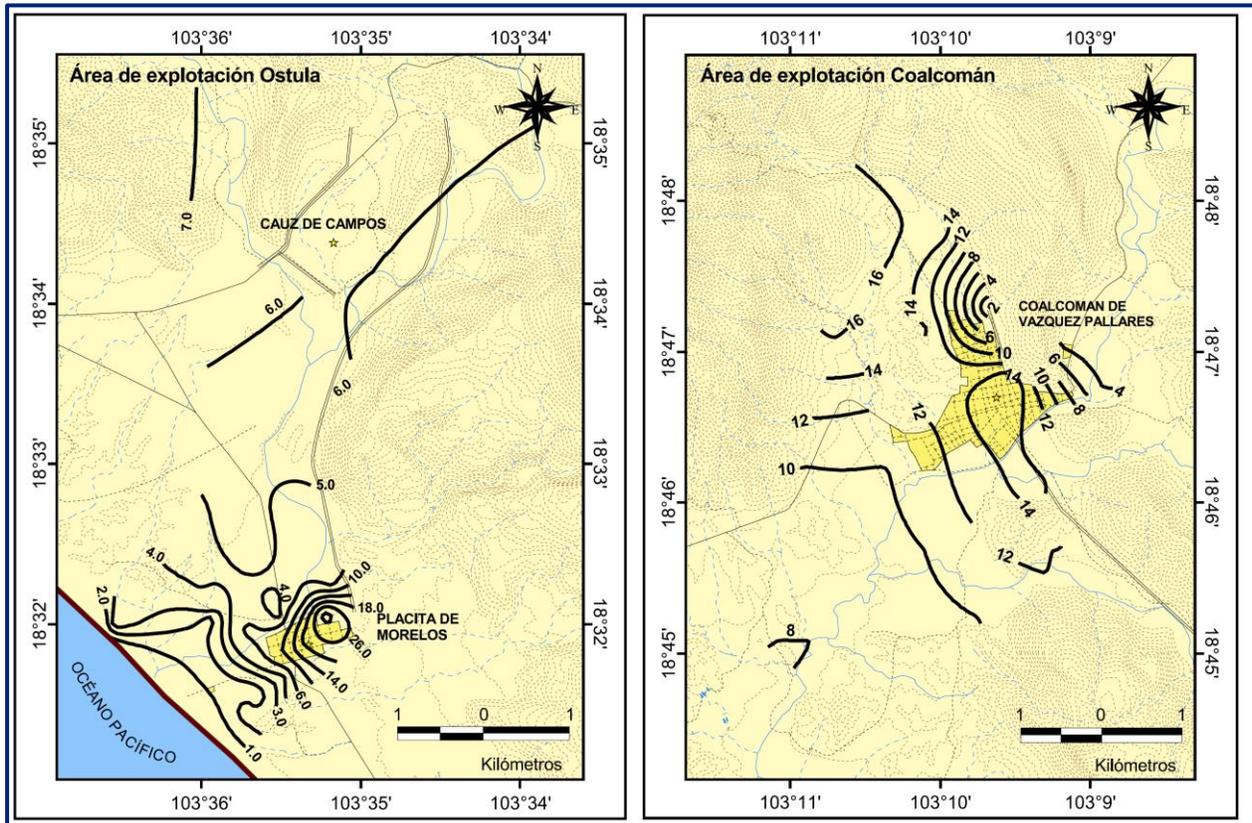


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

En el área de explotación Coalcomán, ubicada en el poblado del mismo nombre, la profundidad al nivel estático varía de 2 a 16 m. El valor mínimo de profundidad al nivel estático se presenta al norte del poblado Coalcomán, mientras que en la zona noroeste se presentan los valores más altos.

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de la elevación del nivel estático para el año 2009 en el área de explotación, no existen abatimientos importantes, en la localidad de La Placita de Morelos los valores de la elevación del nivel estático varían de 0 a 65 msnm; mientras que en el área de explotación de Coalcomán oscilan entre 950 a 1065 msnm

(figura 5). La zona de recarga más importante se encuentra localizada en las inmediaciones del poblado Cruz de Campos.

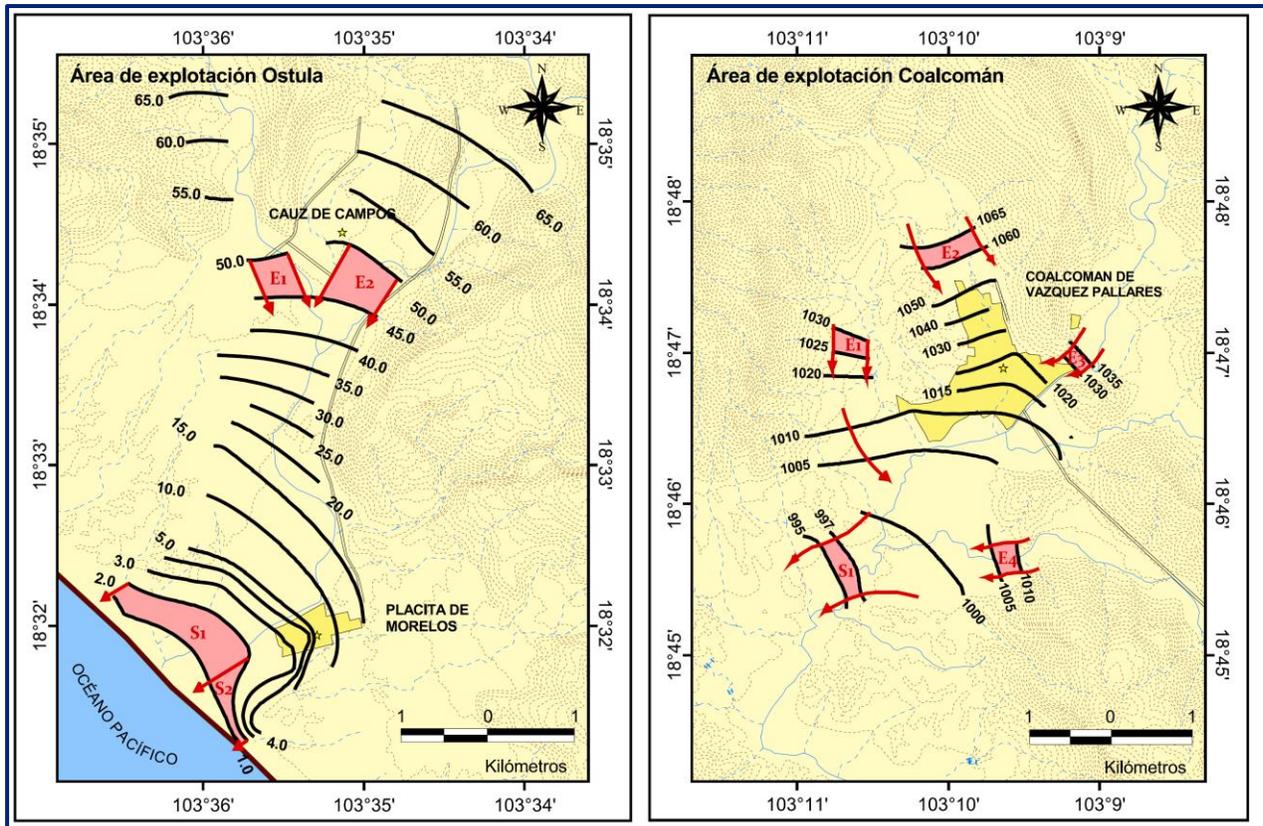


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar una configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas se encuentran dispersas en tiempo y espacio son insuficientes.

Adicionalmente, el volumen de extracción es inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

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.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 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 340 a 3,812 ppm, registrado en las porciones norte y sureste de la planicie costera, respectivamente.

En la zona donde se concentran los aprovechamientos las concentraciones de STD varían de 394 a 464 ppm, y a partir de esta ella se incrementan en dirección al suroeste, hacia la costa.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron 2 familias de agua principales, el agua de menor salinidad corresponde a la familia bicarbonatada Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), mientras que la de mayor salinidad está representada por la familia clorurada sódica (Cl-Na).

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

Sin embargo el aprovechamiento CNA1619-01, que se ubica en la parte costera del acuífero, al oeste de la zona de balance, sobrepasa los límites establecidos para consumo humano en los siguientes parámetros: STD, Dureza total, Cl, SO_4 , Na, Fe, Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF); así mismo, el aprovechamiento CNA1619-04 sobrepasa los límites para Fe, CT y CF, y los aprovechamientos CNA1619-25, CNA1619-31 CNA1618-51 sobrepasan los límites para CT y CF.

En cuanto a la concentración de CaCO_3 , existen dos tipos de agua, agua dura y agua muy dura.

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, el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C2) a alta (C3) y contenido bajo de sodio (S1), que indican el incremento en la salinidad del agua, pero sin incremento de sodio intercambiable.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo realizado en 2009, se registraron un total de 56 aprovechamientos de agua subterránea, de las cuales 44 son norias, 8 pozos y 4 manantiales. La explotación del acuífero se realiza principalmente en la parte sur (zona costera) y al noroeste del acuífero, su ubicación obedece a la zona de mayor desarrollo dentro del acuífero abasteciendo poblaciones importantes como San Juan de Alima, Placita de Morelos, Cruz de Campos y Coalcomán de Vázquez Pallares. Del total de obras 48 están activos y 8 inactivos.

De las obras activas, 23 aprovechamientos se destinan al uso agrícola, 12 al doméstico y 12 al público-urbano, 6 a servicios y 3 a pecuario. El volumen de extracción estimado asciende a **2.2 hm³/año** (0.9 En Ostula y 1.3 en Coalcomán). Adicionalmente, 1.0 hm³ anuales se descargan a través de pequeños manantiales. Del volumen de extracción por bombeo, 0.7 hm³ (31.8 %) se destinan al uso agrícola y los 1.5 hm³ restantes (68.2%) para dotación de agua potable a la población de las comunidades de la región. El volumen destinado al uso doméstico-abrevadero es muy pequeño.

De igual manera, los 1.0 hm³ anuales que descargan los manantiales se destinan en su totalidad para dotación de agua potable a la población de las comunidades de la región.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2009, en las dos zonas donde existe el mayor número de aprovechamientos y por lo tanto la mayor extracción de aguas subterráneas, abarcando una superficie de 13 km² para el área de Ostula y de 11 km² para el área de Coalcomán, en total 24 km².

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre 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). Debido a que los volúmenes de agua destinados tanto al uso agrícola como al público-urbano son muy pequeños, para fines del balance se considera que no existe recarga inducida.

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:

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

Donde:

- Rv**= Recarga vertical;
- Eh**= Entrada por flujo subterráneo horizontal;
- B**= Bombeo;
- Sh**= Salidas por flujo subterráneo horizontal;
- ETR**= Evapotranspiración;
- Dm**= Descarga por manantiales;
- ΔV**= Cambio de almacenamiento;
- S**= Coeficiente de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

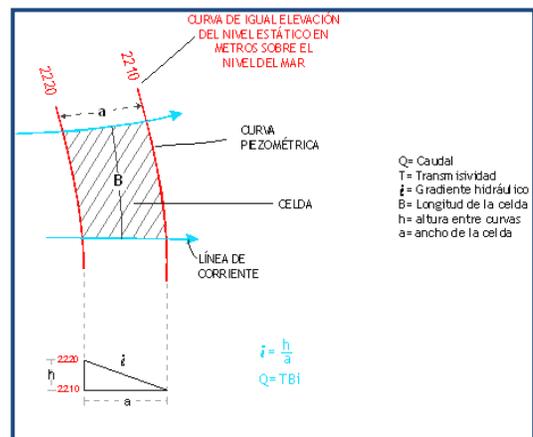
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la 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 2009, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde:

- Q** = Caudal (m³/s)
- B** = Longitud de la celda (m)
- i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)
- T** = Transmisividad (m²/s)



Dentro del área de balance las principales zonas de recarga de agua subterránea se encuentran en la parte norte del área de explotación, a la altura del poblado de Cruz de Campos, para el caso de la zona de Ostula, y Corral de Las Yegüas, Chinistilla y los Manguitos para el área de Coalcomán. Los resultados de cada uno de los canales de entradas aparecen en la tabla 2 y 3, para las áreas de explotación de Ostula y Coalcomán correspondientes al año 2009.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo (2009). Área de explotación Ostula

CELDA	T ($\times 10^{-3}$ m ² /s)	B (m)	i	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
ENTRADAS HORIZONTALES					
E ₁	1.48	433	0.010	0.006	0.20
E ₂	1.48	646	0.008	0.008	0.25
Total					0.45

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo (2009). Área de explotación Coalcomán

CELDA	T ($\times 10^{-3}$ m ² /s)	B (m)	i	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
ENTRADAS HORIZONTALES					
E ₁	0.20	418	0.020	0.002	0.05
E ₂	0.50	717	0.019	0.007	0.21
E ₃	0.50	298	0.028	0.004	0.13
E ₄	0.50	379	0.018	0.003	0.11
Total					0.50

Los valores T utilizados para el cálculo de entradas y salidas corresponden al promedio obtenido de las pruebas de bombeo realizadas en el 2009, adaptadas al espesor saturado de cada celda. El volumen total de entradas por flujo horizontal subterráneo asciende a **1.0 hm³ anuales**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), en menor proporción por evapotranspiración (ETR) y también por descarga a través de manantiales (Dm).

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 **2.2 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 la configuración de elevación de nivel estático para el año 2009, mostrada en la figura 5. Las celdas de salida en el área de Ostula se localizaron en la parte más baja del área de explotación, paralelas a la línea de costa, y para el caso de la zona de Coalcomán están orientadas al suroeste. Los valores estimados para el año de análisis se muestran en las tablas 4 y 5, respectivamente para ambas áreas. El valor total de las salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **1.4 hm³/año**.

Tabla 4. Salidas por flujo subterráneo (2009). Área de explotación Ostula

CELDA	T (x10 ⁻³ m ² /s)	B (m)	i	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
SALIDAS HORIZONTALES					
S ₁	5.10	1616	0.003	0.025	0.8
S ₂	1.02	895	0.003	0.003	0.1
Total					0.9

Tabla 5. Salidas por flujo subterráneo (2009). Área de explotación Coalcomán

CELDA	T (x10 ⁻³ m ² /s)	B (m)	i	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
SALIDAS HORIZONTALES					
S ₁	2.10	757	0.010	0.016	0.5
Total					0.5

7.2.3 Descarga por manantiales (Dm)

Existen en el acuífero 4 pequeños manantiales destinados para el abastecimiento de agua potable, que en conjunto descargan un volumen de **1.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.95 corresponden a la zona de Ostula y los 0.05 hm³ restantes a Coalcomán.

7.2.4 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 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

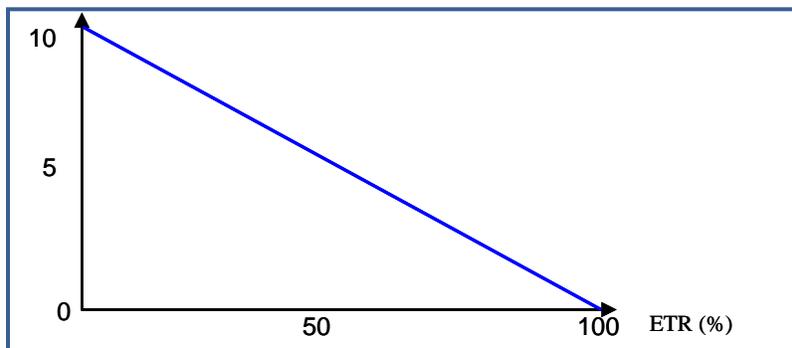
los valores medios anuales de temperatura = 26° C y precipitación= 1032 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 934.9 mm.

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

T (°C) =	26		
P(mm) =	1032	P ² =	1065024
L =	1828.8	L ² =	3344509.44
ETR (mm)	934.9		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 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.

$$\text{ETR} = (934.9 \text{ m}) (0.67) = 0.626.4 \text{ m.}$$

En el área de balance existe una superficie de 4.0 y 2.0 km², respectivamente para las zonas de Ostula y Coalcomán, donde se presentan niveles freáticos someros. Si tomamos en cuenta el 67 % de la lámina de ETR (626.4 mm) y una profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 2 y 4 m, respectivamente, de acuerdo con la gráfica anterior.

$$\begin{aligned}\text{ETROSTULA} &= 4.0 \text{ km}^2 (0.6264 \text{ m}) (0.8) = 2.0 \\ \text{ETRCOALCOMÁN} &= 2.0 \text{ km}^2 (0.6264 \text{ m}) (0.6) = 0.8\end{aligned}$$

Por lo tanto, el valor promedio es $\text{ETR} = 2.8 \text{ hm}^3/\text{año}$

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

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 se encuentran dispersos en tiempo y espacio y sólo cubren una pequeña porción, debido a que no existe una red piezométrica. Adicionalmente, la configuración de elevación del nivel estático no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento, causadas por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos.

Por ello se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto, $\Delta V(S) = 0$.

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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR + Dm \pm \Delta V(S) - E_h & (2) \\ R_v &= 2.2 + 1.4 + 2.8 + 1.0 - 0.0 - 1.0 \\ R_v &= 6.4 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 6.4 + 1.0 \\ R &= 7.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **7.4 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 **2.9 hm³ anuales**, de los cuales corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y al 50 % de la evapotranspiración que deben preservarse para proteger la flora ribereña y el ecosistema costero (ambas consideraciones se refieren a la zona costera "Ostula"); y el restante a la descarga por manantiales que se utilizan para abastecimiento de agua a las comunidades de la región.

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 **5,619,910 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 7.4 - 2.9 - 5.619910 \\ \text{DMA} &= -1.119910 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **1,119,910 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.