



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO COAHUAYANA (1621) 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.....	8
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	9
4.1	Estratigrafía.....	10
4.2	Geología estructural.....	13
4.3	Geología del subsuelo.....	14
5	HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1	Tipo de acuífero.....	15
5.2	Parámetros hidráulicos.....	15
5.3	Piezometría.....	16
5.4	Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	18
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	20
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	20
7.1	Entradas.....	21
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.1.3	Recarga inducida (Ri).....	23
7.2	Salidas.....	23
7.2.1	Evapotranspiración (ETR).....	23
7.2.2	Extracción por bombeo (B).....	25
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	25
7.2.4	Descarga a través de manantiales (Dm).....	26
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	26
8	DISPONIBILIDAD.....	27
8.1	Recarga total media anual (R).....	27
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	28
9	BIBLIOGRAFÍA.....	30

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 Coahuayana, definido con la clave 1621 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza al suroeste del estado de Michoacán y abarca una superficie de 1,378 km², entre las coordenadas 18° 36' y 19° 02' de latitud norte y los meridianos 103° 10' y 103° 45" de longitud oeste.

Limita al norte con los acuíferos Ciudad Guzmán y Barreras del estado de Jalisco, al este con Ostula del estado de Michoacán, al oeste con Alzada-Tepames, Valle de Ixtlahuacán y Armería-Tecomán-Periquillos del estado de Colima y al suroeste con el

Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente se ubica dentro de los límites del acuífero la totalidad del municipio Coahuayana, de manera parcial los municipios Coalcomán de Vázquez Pallaréz y Chinicuila, y una pequeña porción del municipio Aquila.

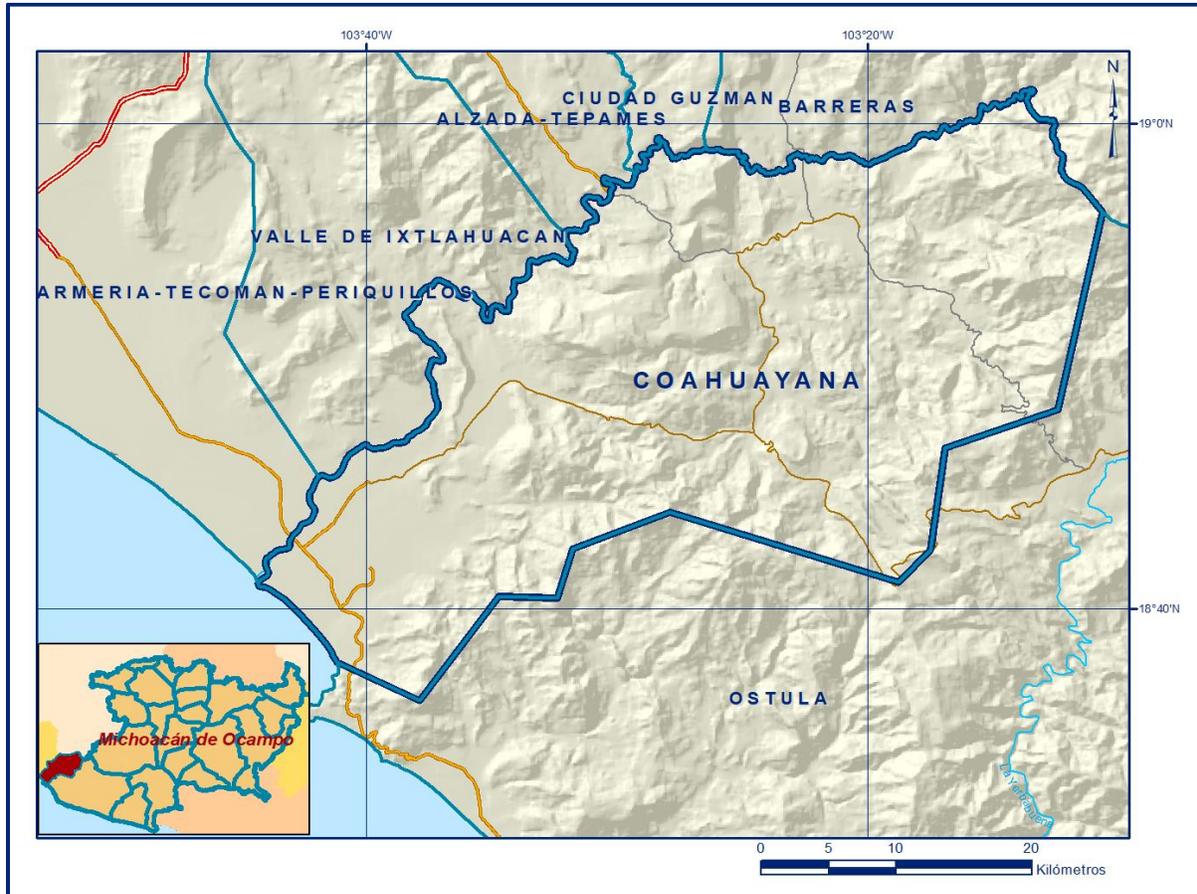


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada

ACUIFERO 1621 COAHUAYANA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	10	37.2	18	56	22.2	
2	103	12	24.8	18	48	14.6	
3	103	16	54.5	18	46	38.2	
4	103	17	28.8	18	42	27.8	
5	103	18	45.8	18	41	6.4	
6	103	27	53.8	18	43	59.8	
7	103	31	47.0	18	42	29.9	
8	103	32	23.0	18	40	27.5	
9	103	34	44.0	18	40	32.4	
10	103	37	52.4	18	36	14.7	
11	103	41	12.0	18	37	50.0	DEL 11 AL 12 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
12	103	44	21.4	18	41	4.9	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE ESTATAL
13	103	41	55.0	18	45	27.5	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	103	32	2.9	18	55	27.9	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	103	29	18.2	18	57	52.0	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	103	26	26.8	18	58	57.8	DEL 16 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	103	10	37.2	18	56	22.2	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Coahuayana 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 este: *“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 centro-oeste *“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.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua²⁰²⁴, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El usuario principal del agua subterránea es el sector agrícola.

El acuífero forma parte de la Comisión de Cuenca Ayuquila-Armería; en la porción suroeste se localizan terrenos del Distrito de Riego Estado de Colima, no 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. Algunos lo han cubierto de manera parcial y otros lo incluyen en estudios regionales. A continuación, se mencionan los más importantes.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA URUAPAN Y COAHUAYANA, MICH., realizado en 1980, para la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas, de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la empresa Ariel Construcciones, S. A. El objetivo principal de este estudio era incrementar el desarrollo agrícola en las zonas de Uruapan y de Coahuayana. Para la elaboración del estudio, se efectuó el censo de 64 aprovechamientos de agua subterránea (38 pozos, 21 norias y 5 manantiales), y al mismo tiempo, se realizaron mediciones piezométricas en el mes de septiembre de 1980, en la época de lluvia; se hicieron 25 sondeos eléctricos verticales (SEV), con lo que se determinó la posición de la interface salina, localizada a 200 m de profundidad, a 1 km de la costa, y se determinó la estructura geológica del subsuelo, diferenciando las unidades horizontales permeables y las impermeables.

Otra actividad efectuada fue la toma de muestras de 22 captaciones en el acuífero de Coahuayana, que fueron analizadas en el laboratorio, resultando que el agua subterránea es de buena calidad; se hicieron 14 pruebas de bombeo de corta duración, aunque sólo fueron interpretables 7 de ellas, ya que el equipo de las norias es deficiente, lo que propició que los caudales no fueran constantes. La extracción en este acuífero era de $8.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, a través de pozos y de norias.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE COAHUAYANA Y ZAMORA, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN, 2008, realizado para la Comisión Nacional del Agua, por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

El objetivo general de este estudio es actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas en el acuífero Coahuayana, en el estado de Michoacán, y los objetivos específicos son los que se describen a continuación: Contar con un censo actualizado de las captaciones de agua subterránea. Determinar el volumen de extracción de agua subterránea. Cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga (natural, inducida y artificial).

Obtener los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo: conductividad hidráulica, espesor del acuífero, transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Ajustar el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero para la unidad geohidrológica estudiada y elaborar el balance hidrológico de la subcuenca y de aguas subterráneas en el acuífero. Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se encuentra enclavado dentro de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur (INEGI,1997), su relación con la placa de Cocos le da sus rasgos característicos, la cual se desplaza de 2 a 3 cm anualmente, por lo que en esta provincia existe alta sismicidad y es la responsable del origen y la evolución de esta zona.

Tiene como basamento rocas cristalinas y metamórficas, calizas plegadas, asociadas a sedimentos clásticos, lavas e intrusiones. Es una unidad conformada por rocas disectadas profundamente, plegadas y afalladas, que han sido afectadas, por intrusiones del Pre-Cámbrico, Paleozoico y Paleógeno-Neógeno. Cubre una superficie de 13,000 km², con un rumbo noroeste-sureste; casi no tiene valles intermontanos, pero es una región de gran tectonismo activo, representado por fallas y grietas, con una altitud media de 2,000 msnm.

Esta provincia se divide en tres subprovincias fisiográficas: Costas del Sur, Cordillera Costera del Sur y Depresión de Tepalcatepec. La zona acuífera está enclavada en la subprovincia de la Cordillera Costera del Sur, que se extiende de Oeste a Este, en la parte baja del volcán de Colima hasta Pochutla y Puerto Ángel, Oaxaca, paralela a las costas de Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca, desde la margen occidental del río Naranjo (Coahuayana), con 850 km de largo y de 40 a 140 km de ancho, con dirección Norte-Sur.

3.2 Clima

En la mayor parte del acuífero se presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano; en una pequeña parte, principalmente, en serranías, el clima es semicálido templado subhúmedo, con temperaturas entre 17 y 20° C. En ambos casos, las lluvias ocurren en el verano, y representan del 5 al 10.2% al año.

Para el cálculo de la precipitación media anual, se utilizó el método de las isoyetas, y de ahí obtener la altura de la precipitación media; el cual consiste en dibujar, con base en la información registrada en las estaciones climatológicas, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación; después de esto, se obtiene un promedio pesado de la lluvia, según la expresión:

$$\bar{h}p = \frac{1}{A_T} \sum_{t=1}^{n'} (\bar{h}p_i A_i)$$

Dónde:

hp = Altura de precipitación promedio en el periodo analizado

A_T = Área total de la cuenca

A_i = Área entre dos isoyetas y/o el parteaguas de la cuenca

hp_i = Altura de precipitación promedio entre dos isoyetas

El cálculo de la altura de precipitación media para el periodo 1970-2004, se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de la altura de precipitación media

Número de área	Área (km ²)	Altura de precipitación media $\bar{h}p_i$ (mm)	(A _i)($\bar{h}p_i$)
A	10.04	1,000.00	10,040.0
B	83.04	950.00	78,888.0
C	723.35	850.00	614,847.50
D	574.34	775.00	445,113.50
Total	1,390.77		1,148,889.0

De la división de (A_i) ($\bar{h}p_i$) entre el área total del acuífero, se obtiene una altura media de precipitación de **826.1 mm**.

Las isoyetas medias anuales de la región, para el intervalo 1970-2004, presentan curvas cuyos valores van de 700 a 2,000 mm. Dentro del acuífero, los valores menores se localizan en la franja costera, mientras que los mayores ocurren en las porciones oriental y nororiental, que es donde se encuentran las máximas elevaciones de la zona. Los meses más lluviosos son julio, agosto y septiembre, aunque en los últimos 10 años, se tienen precipitaciones en los meses de noviembre y diciembre.

La temperatura media anual en el periodo 1970-2006, tiene valores de 19.1 a 23.7° C, con una media de **21.6° C**. Las temperaturas más altas se presentan en las partes bajas

del acuífero, y las menores, hacia las porciones montañosas, en especial, al noreste de la zona, siendo los meses más calurosos, julio, agosto y septiembre. La evaporación potencial media anual presenta valores que van de 2,892.4 a 256 mm, con un valor medio de 1,164.5 mm, con variación estacional semejante a la de la temperatura.

3.3 Hidrografía

El acuífero Coahuayana se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 16 Armería-Coahuayana, que tiene una superficie aproximada de 8,078.5 km², aunque sólo 1,495.4 km² pertenecen al estado de Michoacán. Comprende los ríos Coahuayana y Mezcala, los que desembocan al Océano Pacífico.

Igualmente, forma parte de dos subregiones, una el “Río Coahuayana”, siendo su corriente principal el río Coahuayana, y la otra la subregión del Río Cachán o Coalcomán y otros, siendo el río Coalcomán la corriente principal, que desemboca al sur de la Bahía Maruata en el Océano Pacífico. Está formada por las cuencas de los ríos Armería y Tuxpan o Coahuayana, entre los estados de Michoacán, Colima y Jalisco, siendo éste último el que contiene la mayor parte de la superficie de la cuenca y, únicamente, una porción pequeña se extiende en la entidad michoacana.

Ahí, las corrientes circulan al poniente, para concurrir en el río Coahuayana. Dentro del estado de Michoacán, esta región se divide en las cuencas de los ríos: Coahuayana, Trojes y Aquila, donde, a su vez, se ubican los arroyos Ashotán, El Ahijadero y Seco, así como Estero de Mezcala y Laguna de Colorada. Dichas corrientes confluyen en el Océano Pacífico.

La cuenca del río Coahuayana tiene una superficie de 1,495.35 km², dentro del estado de Michoacán; nace en las inmediaciones del cerro El Tigre, al sureste del estado de Jalisco. También se le conoce como río Tuxpan. Recibe aportaciones de varias corrientes, tales como el río Tachinaste y el Arroyo de Las Varas; cambia su nombre por el de río Naranjo hasta confluir con su tributario, el río Cobianes, por la margen derecha, que es precisamente el punto donde cambia su nombre a río Coahuayana, hasta descargar sus aguas en el Océano Pacífico. Los principales sistemas hidrográficos de Coahuayana son, el río de mismo nombre y la zona de esteros comprendida de sur a norte por las lagunas Colorada, Mezcala y Tules, mismas que sirven como un sistema de equilibrio entre las fases de agua dulce y salada.

3.4 Geomorfología

En la región costera los agentes erosivos han modelado el paisaje de las cuencas abiertas, entre las que se encuentra la de Coahuayana y su continuación, Armería-Tecomán-Periquillos, en el estado de Colima, cuyo drenaje descarga en el océano Pacífico. Las fronteras laterales al flujo del agua subterránea están en contacto con los sedimentos fluviales y las calizas cretácicas que bordean el valle.

Esta zona pertenece a una angosta faja que va desde la desembocadura del Río Coahuayana a la confluencia del río Balsas, entre los estados de Colima y Guerrero, con forma discontinua de escasa extensión y altitud de 60 m. La parte alta corresponde a la Sierra Madre del Sur, que es el sistema montañoso más reciente del país, que se extiende desde Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca hasta Chiapas, con alturas de 2,500 m.

4 GEOLOGÍA

Las rocas del acuífero son, principalmente, sedimentarias, tales como: areniscas, limolitas, lutitas, calizas, depósitos de pie de monte, de playa y barra, lacustres, de llanura de inundación y fluviales, así como rocas ígneas intrusivas como la diabasa. Sus edades fluctúan de Pre-Cretácico al Reciente, como se puede ver en la figura 2.

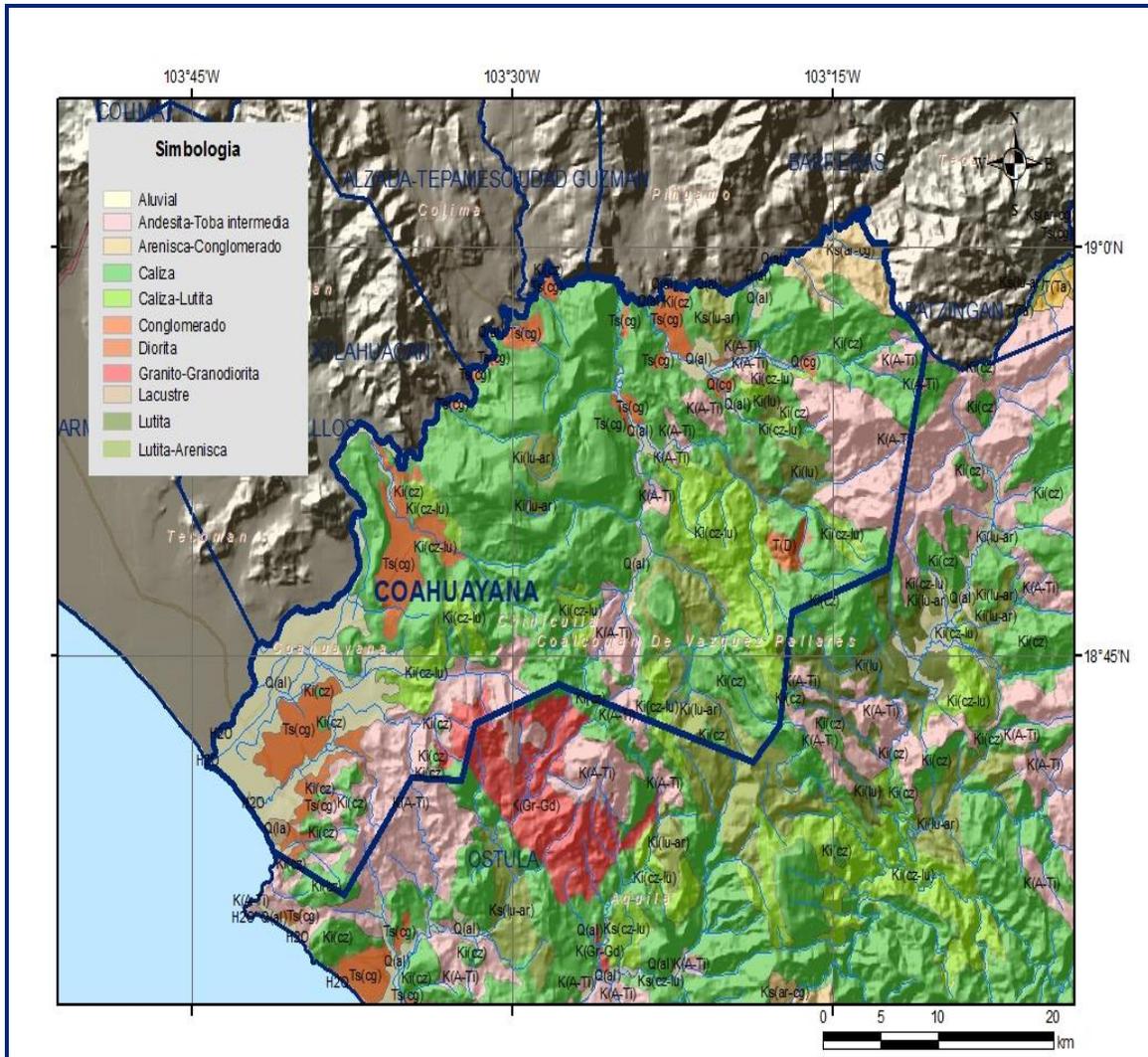


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

A continuación, se describen las rocas que conforman al acuífero, por edades, de las más antiguas a las más recientes, ya sea que se encuentren aflorando o a profundidad.

PRE-CRETÁCICO

Areniscas, limolitas y lutitas

Esta unidad está constituida por areniscas, lutitas y conglomerados que forman macizos montañosos, con drenaje dendrítico que ha dado origen a cañadas profundas.

Se puede observar en la sierra de Aquila, al sur de la zona; en su parte baja se encuentran lutitas con estructura laminar y de color rojo; se intercalan con limolitas estratificadas, rojas y grises, que al intemperizar tienen colores rojo pardo y verde olivo;

se presentan bien estratificadas, cuyas capas muestran un buzamiento de 45° y dirección S5°W.

Al oriente de la ranchería Zapotlán y a lo largo del arroyo del mismo nombre, afloran areniscas de grano fino, color verde grisáceo; sus capas son de medias a delgadas, con espesor de 10 cm, que al intemperizar cambian su color a café verdoso; tienen una inclinación de 45°, con rumbo S4°E. De igual forma, se observan estas rocas, a 7 km al oriente del poblado Nuevo Coahuayana, aunque su color es gris verdoso oscuro, en capas gruesas con estructura laminar y bien cementadas.

A 1 km al Sur de San Telmo, sobre la carretera a Lázaro Cárdenas, se observa un conglomerado color gris morado constituido por clásticos de limolita, con tamaños que van de grava a gravilla, de capas gruesas, bien cementado y con matriz arcillo-arenosa. Ahí, el conglomerado está intrusionado por un dique de diabasa color verde.

También, 500 km más adelante, sobre esta carretera, se aprecia el contacto superior de esta unidad de rocas, con calizas del Cretácico, mientras que a 3 km al Sur de la localidad de San Telmo, son intrusionadas por un tronco diabásico, y a 9 km hay un afloramiento de 150 m de espesor, con una secuencia de areniscas color verde y grano fino interdigitadas con calizas arenosas y limolitas negras; sobre ellas se encuentran las calizas de color gris, de edad Cretácico, volviéndose a observar esta secuencia al Sur del campo experimental de Amastique; hacia arriba aparecen lutitas de color gris verdoso a amarillo verdoso, y están cubiertas por capas de calizas color gris.

CRETÁCICO

Calizas

Generalmente, afloran al norte de la región, siendo estructuras plegadas, en capas gruesas, masivas, con oquedades de disolución, que se presentan en las porciones oriental y occidental de la ranchería San Miguel Ojo de Agua, donde su color es gris claro a medio y son macrofósilíferas y microfósilíferas (rudistas o miliólidos).

Aproximadamente, a 4 km sobre la brecha que comunica con Amatique, al Noreste de la localidad Camalote, aflora una secuencia de calizas color gris oscuro a negro, con capas delgadas de 30 a 60 cm de espesor y que intemperiza en color gris claro. Por su contenido de rudistas y miliólidos del Albiano-Cenomaniano, y particularidades semejantes a las rocas calcáreas de la Formación Aurora, se les asigna una edad del Cretácico Inferior.

Forman numerosos manantiales y lloraderos, en la sierra, distinguiéndose los de Amatique y El Agua Fría, por sus caudales significativos. Cabe mencionar que el manantial de Amatique nace en el contacto entre las calizas con lutitas y las limolitas rojas.

Diabasa

Las diabasas son rocas ígneas intrusivas, que en la zona se encuentran formando diques. Son rocas de color gris olivo oscuro, afanítico, que intemperiza a café rojizo oscuro, siendo su principal afloramiento, un pequeño tronco intrusivo de diabasa, que corta a las areniscas y limolitas rojas. También, se observa a 3 km de Punta San Telmo, sobre la carretera que va a Lázaro Cárdenas, donde se encuentra erosionando a limolitas, areniscas y conglomerados rojos del Pre-Cretácico. De acuerdo con la posición que guarda con las rocas pre-cretácicas que está intrusionando, tiene una edad posterior al Pre-Cretácico.

PALEÓGENO-NEÓGENO

Antiguos abanicos aluviales

Se trata de materiales no consolidados localizados en las partes del centro y Norte de la zona, que conforman pequeños lomeríos aislados, de 10 a 20 m de altura, constituidos por capas gruesas de areniscas calcáreas de grano fino, con contenido de feldespato y clásticos de rocas volcánicas.

Se encuentran interdigitadas con capas de gruesos boleos formados por clásticos de basalto, calizas y limolitas, con tamaños que van de peñascos a gravas, contenidos en una matriz arenosa, y cementados con carbonato de calcio. Como sobreyacen discordantemente a las rocas cretácicas, y son cubiertas, también, en forma discordante, por depósitos de las llanuras de inundación, se le ha asignado una edad del Neógeno al Cuaternario Inferior.

Su posición es casi horizontal, con inclinación hacia la costa. Por sus oquedades de disolución, esta unidad presenta permeabilidad alta, que la hace buena formadora de acuíferos, como lo demuestran los pozos que la atraviesan. Se encuentra diseminada en el subsuelo de la mayor parte de la planicie costera.

CUATERNARIO

Depósitos de pie de monte

Los depósitos de pie de monte se encuentran, principalmente, en las estribaciones de la sierra de Aquila, en la porción suroeste de El Ranchito, y están conformados por

materiales de composición calcárea y de areniscas contenidos en una matriz arenarcillosa, con tamaño que varía de peñascos a gravas. Se les ha dado una edad del Cuaternario.

Depósitos de playa y de barra

Abarcando toda la línea costera, los depósitos de playa están compuestos por arenas finas de cuarzo y feldespato, mientras que los depósitos de barra conforman lomeríos de líneas suaves, de 2 a 3 m de altura, constituidos por arenas finas de cuarzo y feldespato color gris claro; se localizan junto a los anteriores, formando una delgada franja, también, a lo largo de la costa.

Depósitos lacustres

Es una unidad que se extiende a lo largo de la planicie costera, entre los depósitos de barra y los de llanura de inundación; están formadas por arcillas y limos de color gris medio a oscuro.

Pueden ser afectados por inundación, en la época de lluvias. Su edad es del Reciente, por la posición estratigráfica que ocupan con respecto a los depósitos de barra y las llanuras de inundación.

Depósitos de llanura de inundación

Estos depósitos están conformados por arenas finas y gruesas, con espesores que van de 2 a 5 m; su color es de café grisáceo a café amarillento. Ocupan la mayor parte de la planicie costera. Cubren discordantemente a los abanicos aluviales, y se les ha dado una edad del Cuaternario-Reciente.

RECIENTE

Depósitos fluviales

Se refiere a una serie de gravas y arenas que se localizan sobre el cauce del río Coahuayana y de los arroyos principales de la zona levantada que, además, forman meandros y terrazas. Son depósitos compuestos por arenas finas y gruesas, así como lentes de boleó; aguas arriba de los ríos, se presentan como clásticos gruesos constituidos por rocas calcáreas y areniscas.

4.2 Geología estructural

La zona montañosa está constituida por una serie de anticlinales y sinclinales simétricos, intensamente plegados, siendo uno de los que destaca el anticlinal simétrico que forma parte de la sierra de Aquila; está compuesto por areniscas y

limolitas rojas, mientras que sus flancos Norte y Sur están conformados por calizas cretácicas, con buzamiento 30° al sureste, e inclinación N25°W.

Al Norte del área elevada, se aprecian anticlinales y sinclinales simétricos, con flancos y núcleo constituidos por calizas del Cretácico Inferior.

Parte del batolito Michoacán-Guerrero se encuentra aflorando por medio de varios troncos y salientes, tales como: Ostula, Aquila, Chila, La Mira, Los Pozos y Tizupán, cuya edad varía de 84 a 38 millones de años.

En las rocas cretácicas se tienen anticlinales, sinclinales y cabalgaduras, siendo la estructura más relevante el anticlinal Coalcomán, que es asimétrico y llega a tener una longitud de 60 km, con rumbo N40°W. Fallas de tipo normal, con rumbo NW45°SE, conforman fosas y pilares que, a su vez, son delimitados por un sistema de fallas laterales, que presentan dos direcciones: NW-SE y NE-SW.

4.3 Geología del subsuelo

Según sus características, principalmente, permeabilidad, compactación y granulometría, las rocas que conforman acuíferos en la zona son las unidades de calizas cretácicas, los antiguos abanicos aluviales y las llanuras de inundación localizados tanto en la planicie costera como en las áreas montañosas.

Las calizas contienen oquedades de disolución y cavidades cársticas, por lo que tienen la capacidad de almacenar y transmitir el agua subterránea; en ellas se forman numerosos manantiales y lloraderos, en la sierra. El manantial de Amatique nace en el contacto entre las calizas con lutitas y las limolitas rojas. La existencia de manantiales pequeños y abundantes en las laderas de los valles es indicativa de una zona saturada poco profunda y una permeabilidad reducida.

Otras unidades con buena permeabilidad son los depósitos de pie de monte, ya que por su posición topográfica y la permeabilidad de sus materiales, funcionan como transmisores del agua de lluvia infiltrada, y como recarga de acuíferos más profundos. De igual manera, los depósitos de playa y de barra presentan permeabilidades altas, facilitando la circulación del flujo subterráneo a través de ellas, y pueden actuar como transmisoras tanto del agua dulce como del agua de mar.

Geohidrológicamente, los depósitos fluviales funcionan como uno de los principales transmisores del agua en los acuíferos del subsuelo de la región, ya que su permeabilidad es alta.

Por el contenido de arcillas y limos que tiene, la unidad de depósitos lacustres presenta permeabilidad baja, siendo formadora de lagunas y pantanos. Finalmente, las areniscas, limolitas y lutitas funcionan como barrera al flujo subterráneo, por estar bien compactadas y cementadas, lo que les confiere una permeabilidad baja, como se observa en el sureste de la zona.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

En esta zona existen dos acuíferos: uno del tipo “libre” constituido por depósitos sedimentarios no consolidados (gravas, arenas y arcillas), que forman la planicie costera, así como abanicos aluviales y llanuras de inundación, con espesores de poco más de 300 m, como máximo, aunque en ciertos sitios se comporta como “confinado”, con artesianismo brotante, y otro, en las partes topográficamente altas, que conforman la zona montañosa, y están compuestos por calizas cretácicas.

Lateralmente, el acuífero granular recibe una recarga de la sierra de Maquila, en su porción oriental; a lo largo del río Coahuayana adquiere otra aportación, de los depósitos fluviales, y en la parte norte se origina otra aportación más, mientras que verticalmente, recibe una importante recarga del agua de lluvia.

El acuífero calizo es alimentado por la lluvia, esencialmente, y al tener contacto con los depósitos de baja permeabilidad, se originan manantiales. En el valle se presenta variación en la permeabilidad, por el contenido de materiales arcillosos, siendo la zona lacustre donde predominan estos, así como en el área cercana a la margen izquierda del río Coahuayana; en el resto de la zona, la permeabilidad es alta, así como en los pies de monte, donde se encuentran arenas, gravas y boleos, y disminuyen los materiales arcillosos.

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 2008. Los valores de transmisividad varían de **4.36×10^{-3} a $2.44 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** , esto es debido a que los depósitos aluviales tienen diferente granulometría y concentración de finos, lo que hace que su permeabilidad se reduzca, aunque, en general, su permeabilidad es de media a alta. En la tabla 3, se presentan los resultados de las pruebas de bombeo.

En los materiales que conforman el acuífero libre, el valor del coeficiente de almacenamiento coincide con el valor de la porosidad eficaz, por lo que se le asignó un rango de **0.05 a 0.03**; mientras que en los sitios donde se vuelve confinado, se estimó de **10^{-3} a 10^{-5}** .

Tabla 3. Resumen de las pruebas de bombeo, 2008

Pozo No.	Profundidad Total (m)	Coordenadas		Q (l/s)	Abatimiento máximo (m)	Qe (lps/m)	b (m)	K (m/s)	Transmisividad m^2/s
		Latitud	Longitud						
4	90	18°42'03.7"	103°38'18.5"	55	10.19	5.40	86.40	5.19×10^{-5}	4.48×10^{-2}
52	125	18°41'46.6"	103°39'46.3"	34	6.51	5.22	114.11	6.21×10^{-5}	7.09×10^{-2}
78	90	18°42'15.7"	103°42'07.0"	120	5.53	21.70	87.04	2.80×10^{-4}	2.44×10^{-2}

5.3 Piezometría

De estudios previos (SARH, 1980), se tienen datos piezométricos de la zona. Los aprovechamientos ubicados en ese estudio y los de 2008, no coinciden, siendo una de las razones el uso de GPS en el estudio de 2008 para la localización de los aprovechamientos.

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró únicamente la información recabada en el estudio realizado en 2008. De los 80 aprovechamientos censados, se pudieron sondear 65, que representa el 81% del número total.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Los valores de la profundidad al nivel estático varían de menos de 1 a 20 m, siendo más someros hacia la línea costera y en las proximidades al río Coahuayana, y se van incrementando hacia el noreste, donde comienza la zona montañosa, aunque, un poco más al nororiente, se observan profundidades someras, posiblemente, de acuíferos "colgados" formados en materiales arcillosos (figura 4).

Es probable que la profundidad al nivel del agua esté condicionada a la topografía de la región y, en ciertos sitios, tenga la influencia del bombeo, como es el caso de los alrededores del poblado de Coahuayana Viejo. También, la geología juega un papel muy importante.

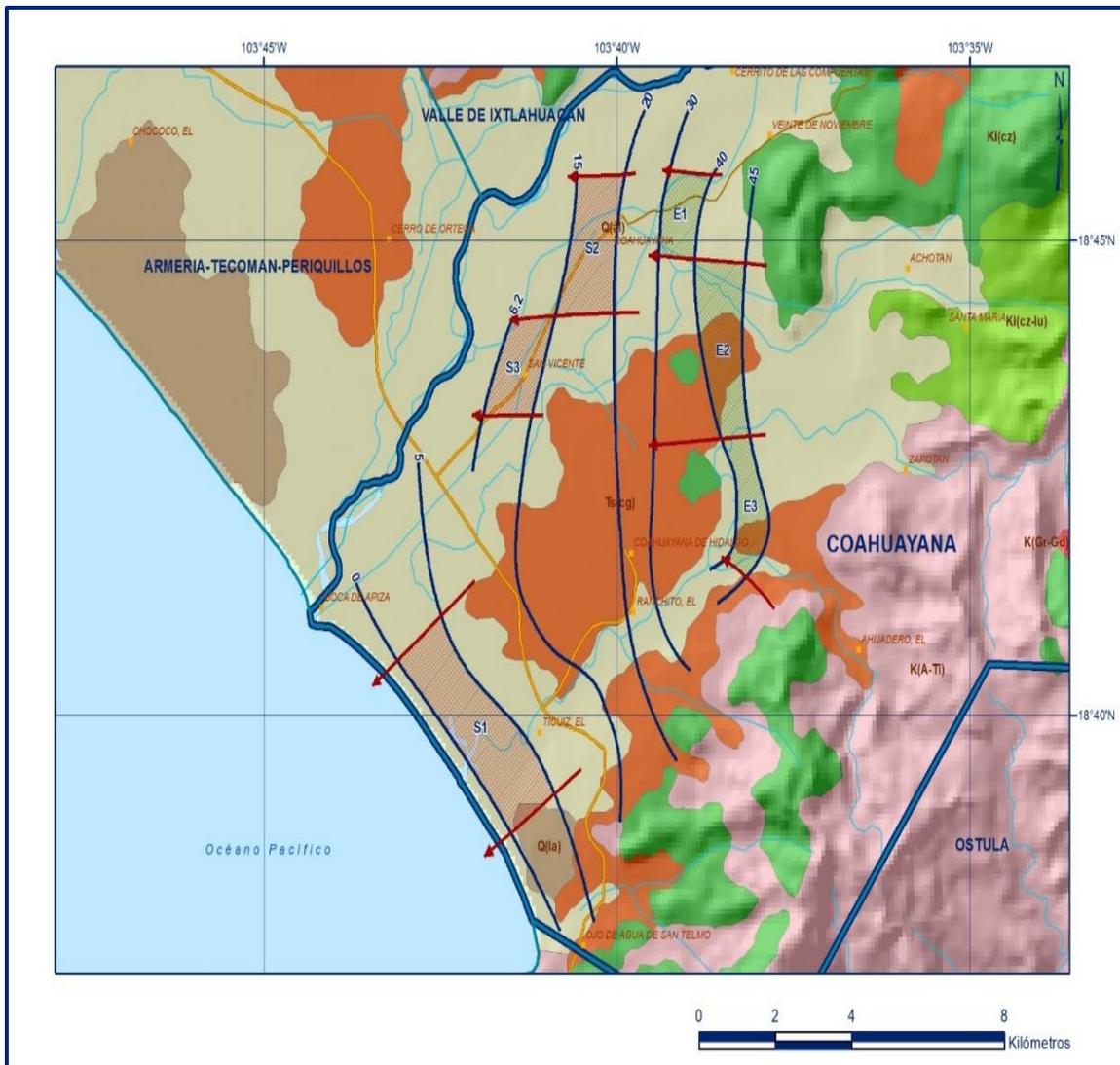


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

Se puede apreciar que existen dos direcciones del flujo subterráneo: una, de noreste a suroeste, confluyendo en el Océano Pacífico, y la otra, de oriente a poniente, a la altura de Coahuayana Viejo hacia el río Coahuayana y, es probable que una parte salga hacia el estado de Colima, rumbo a la localidad de Cerro de Ortega; la otra salida es al mar.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2008, se tomaron muestras en 5 aprovechamientos, distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las captaciones registraron valores de Conductividad Eléctrica de 418 a 980 micromhos/cm; los manantiales tienen valores de 645 a 879 micromhos/cm, lo que indica que los valores del agua están dentro de la norma permisible.

Los Sólidos Totales Disueltos (STD), tienen un rango de valores de 350 a 650 ppm. Al nororiente de Coahuayana, se localizan valores de 350 ppm; el resto de la zona presenta valores de 400 y 600 ppm, lo que indica que el contenido de STD en la mayor parte del acuífero es casi uniforme.

Hacia la línea costera tiene valores de 650 ppm. Presenta la misma tendencia que el flujo del agua subterránea, aumenta en las partes bajas y disminuye en las altas, y tiene dirección noreste-suroeste. No obstante que se trata de una región agrícola, el agua tiene concentración baja de sales, por lo que es apta para cualquier uso.

En los resultados de los análisis en los 5 pozos seleccionados, se destaca lo siguiente: 3 de las muestras pertenecen a las familias de agua cálcico-bicarbonatada y se localizan en la porción oriental de la zona; 1 muestra, que se halla en las proximidades a la costa, se relaciona con la familia mixto-clorurada, y 1 muestra ubicada en la parte suroeste del acuífero, corresponde a la familia sódico-bicarbonatada.

Los valores de Conductividad Eléctrica y RAS, se dibujaron en el nomograma de Wilcox, con lo que se obtuvo la clase de agua para riego, donde se aprecia el predominio de los tipos de agua, C2-S1 y C3-S1, en menor proporción.

Las características de estos tipos de agua son: agua con salinidad media y baja concentración de sodio, y puede ser apropiado para todo tipo de suelos y en salinidad media y baja concentración de sodio, que es apropiada para todo tipo de suelos y de cultivos, con excepción de las plantas sensitivas, como algunos frutales que pueden acumular el sodio en cantidades nocivas.

Es el tipo dominante en la zona. En cuanto al segundo tipo, se refiere a agua con alta salinidad y baja concentración de sodio; no puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado, se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar sólo aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2008, se registró a existencia de 80 aprovechamientos, de los cuales 62 (77%) están activos y 18 (23%) inactivos. De los 62 aprovechamientos activos, 37 son pozos, 22 norias y 3 manantiales. El volumen de extracción conjunta se estimó en **9.6 hm³ /año**, de los cuales 7.06 hm³ (73.8%) se destinan al uso agrícola, 2.48 hm³ (25.9%) al uso público urbano y el restante 0.031 hm³ (0.3%) para usos doméstico, pecuario y de servicios.

Aunado a esto se extraen un volumen anual de 1.4 hm³ , de los manantiales provenientes de calizas, en las partes altas de la zona, los cuales se destinan al uso siguiente: para servir a la población se utiliza 0.71 hm³ (51.8%); para la agricultura, 0.63 hm³ (46%), y para el uso pecuario se emplean 0.03 hm³ (2.2%).

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2008, en la zona donde existe el mayor número de aprovechamientos y por lo tanto la mayor extracción de aguas subterráneas, abarcando una superficie de 169.2 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:

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

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) 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 (R_v), y por flujo subterráneo horizontal (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas (R_{pu}), constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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:

$$E_h + R_v + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S)$$

Dónde:

E_h : Entrada por flujo subterráneo horizontal

R_v : Recarga vertical

R_i : Recarga inducida

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR : Evapotranspiración

ΔV : Cambio de almacenamiento

S : Coeficiente de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4.

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

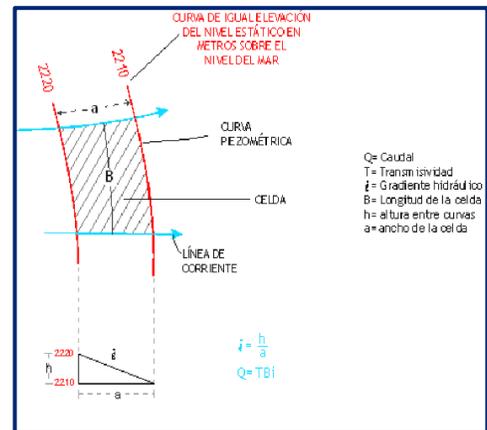
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo;

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T: Transmisividad



Partiendo de esta configuración se seleccionaron los canales de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas.

Los resultados de cada uno de los canales de entradas aparecen en la tabla 4. El volumen total de entradas horizontales es de **3.0 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

Núm. Celda	K (m/s)	b (m)	Transmisividad (T=kb) m ² /s	Ancho de Celda B (m)	Espesor de Celda L (m)	Diferencia (h ₂ -h ₁)	Gradiente Hidráulico i (h ₂ -h ₁ /L)	Caudal (Q=Tbi) m ³ /s	Volumen (hm ³ /año)
									3.0
E1	0.000057	53.46	0.003	4,900	3,000	5	0.0017	0.025	0.8
E2	0.000057	45	0.0026	4,000	1,730	5	0.0029	0.0302	1.0
E3	0.00057	61.52	0.0035	5,000	2,200	5	0.0023	0.0403	1.3

Los valores T utilizados para el cálculo de entradas y salidas corresponden al promedio obtenido de las pruebas de bombeo realizadas en el 2008, adaptadas al espesor saturado de cada celda.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Se considera como una entrada al acuífero la que se origina de los retornos de riego, en el valle se cuenta con una superficie agrícola de 9330 ha, un coeficiente de infiltración de 10.6% y una evaporación potencial de 1164.5 mm, dando un volumen de infiltración de 1.152 hm³/año pero, considerando que solamente el 15% llega a formar parte de la recarga del acuífero, entonces el volumen es de **0.2 hm³/año**.

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 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.

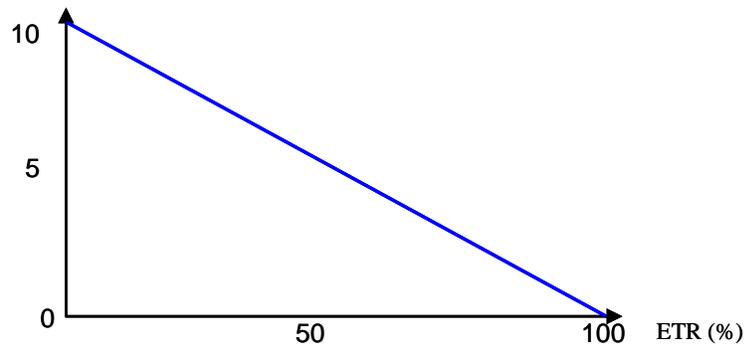
El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 21.6° C y precipitación= 826.1 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 730.8 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) =	21.6		
P(mm) =	826.1	P ² =	682441.21
L =	1343.8848	L ² =	1806026.36
ETR (mm)	730.8		

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.

En el área de balance existen superficies de 10, 12, 15 y 40 km², respectivamente para las zonas donde se presentan niveles freáticos someros. En la tabla 5, se presenta el valor de la evapotranspiración real calculada, que asciende a un valor de **39.7 hm³ anuales**, que es el volumen descargado a la atmósfera.

Tabla 5. Cálculo de la evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad considerada (m)	Área (km ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (hm ³ /año)
1	1	12	0.9	0.731	7.9
01-mar	2	40	0.8	0.731	23.4
03-may	4	15	0.6	0.731	6.6
05-oct	7.5	10	0.25	0.731	1.8
					39.7

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **9.6 hm³/año**.

7.2.3 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 2008, mostrada en la figura 4.

Las celdas de salida en el área se localizaron en la parte más baja del área de explotación, paralelas a la línea de costa. Los valores estimados para el año de análisis se muestran en la tabla 6, donde se puede observar que el valor total de las salidas horizontales asciende a **20.9 hm³ /año**.

Tabla 6. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	7000	1000	5	0.0050	0.0013	0.0455	1.4
S2	3700	1000	5	0.0050	0.0271	0.5014	15.8
S3	2900	1200	8.8	0.0073	0.0054	0.1148	3.6
TOTAL							20.9

7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)

La descarga de los manantiales se estimó con base en el censo de aprovechamientos de agua subterránea que se efectuó en el estudio de 2008. Fueron censados 3 manantiales, que en su conjunto aportan un volumen anual de **1.4 hm³/año**.

Cabe aclarar que los manantiales se originan en calizas cretácicas que pertenecen a una unidad diferente al acuífero regional, fuera del área de balance, por lo que no tienen conexión hidráulica con el acuífero granular que se aloja en el valle, por lo tanto no forma parte del balance de aguas subterráneas, ya que está considerado como parte de la recarga vertical.

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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 9.6 + 20.9 + 39.7 + 0.0 - 3.0 - 0.2 \\ R_v &= 67.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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, las entradas horizontales subterráneas y la recarga inducida por retornos de riego.

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 67.0 + 3.0 + 0.2 \\ R &= 70.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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 (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **70.2 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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 **40.7 hm³ anuales**, de los cuales 20.8 corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y hacia el río Coahuayana y 19.9 hm³ al 50 % de la evapotranspiración que deben preservarse para proteger la flora ribereña y el ecosistema costero.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **25,019,738 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 70.2 - 40.7 - 25.019738 \\ \text{DMA} &= 4.480262 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,480,262 m³/anuales.**

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2008. Estudio de Actualización Geohidrológica de los acuíferos de Coahuayana y Zamora, en el estado de Michoacán, realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.