CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO TEPALCINGO-AXOCHIAPAN (1704), ESTADO DE MORELOS

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 7
3.3 Hidrografía 8
3.4 Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 9
4.1 Estratigrafía 11
4.2 Geología estructural 17
4.3 Geología del subsuelo 18
5. HIDROGEOLOGÍA 19
5.1 Tipo de acuífero 19
5.2. Parámetros hidráulicos 19
5.3 Piezometría 19
5.4 Comportamiento hidráulico 20
5.4.1 Profundidad al nivel estático 20
5.4.2 Elevación del nivel estático 21
5.4.3 Evolución del nivel estático 22
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 23
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 24
7.1 Entradas 25
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 25
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 26
7.1.3 Recarga inducida (Ri) 27
7.2 Salidas 27
7.2.1 Extracción por bombeo (B) 28
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 28
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm) 28
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 28
8. DISPONIBILIDAD 29
8.1 Recarga total media anual (R) 30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 31
9. BIBLIOGRAFÍA 32

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 Tepalcingo-Axochiapan, definido con la clave 1704 por la Comisión Nacional del Agua se localiza en la porción oriental del Estado de Morelos. Los límites extremos se encuentran entre las coordenadas 98° 58' y 98° 36´´ de longitud; 18° 20' y 18° 46' de latitud norte, abarcando una superficie de 671 km^2. Limita al noreste y este con el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros del estado de Puebla; al noroeste y oeste con el acuífero Cuautla-Yautepec del estado de Morelos; al sur con el acuífero Ixcaquixtla del estado de Puebla (figura 1).

Geopolíticamente abarca en forma parcial o total los municipios Tepalcingo, Axochiapan, Zacualpan de Amilpas, Temoac, Jonacatepec y Jantetelco; así como pequeñas porciones de Tetela del Volcán y Tlaquiltenango.

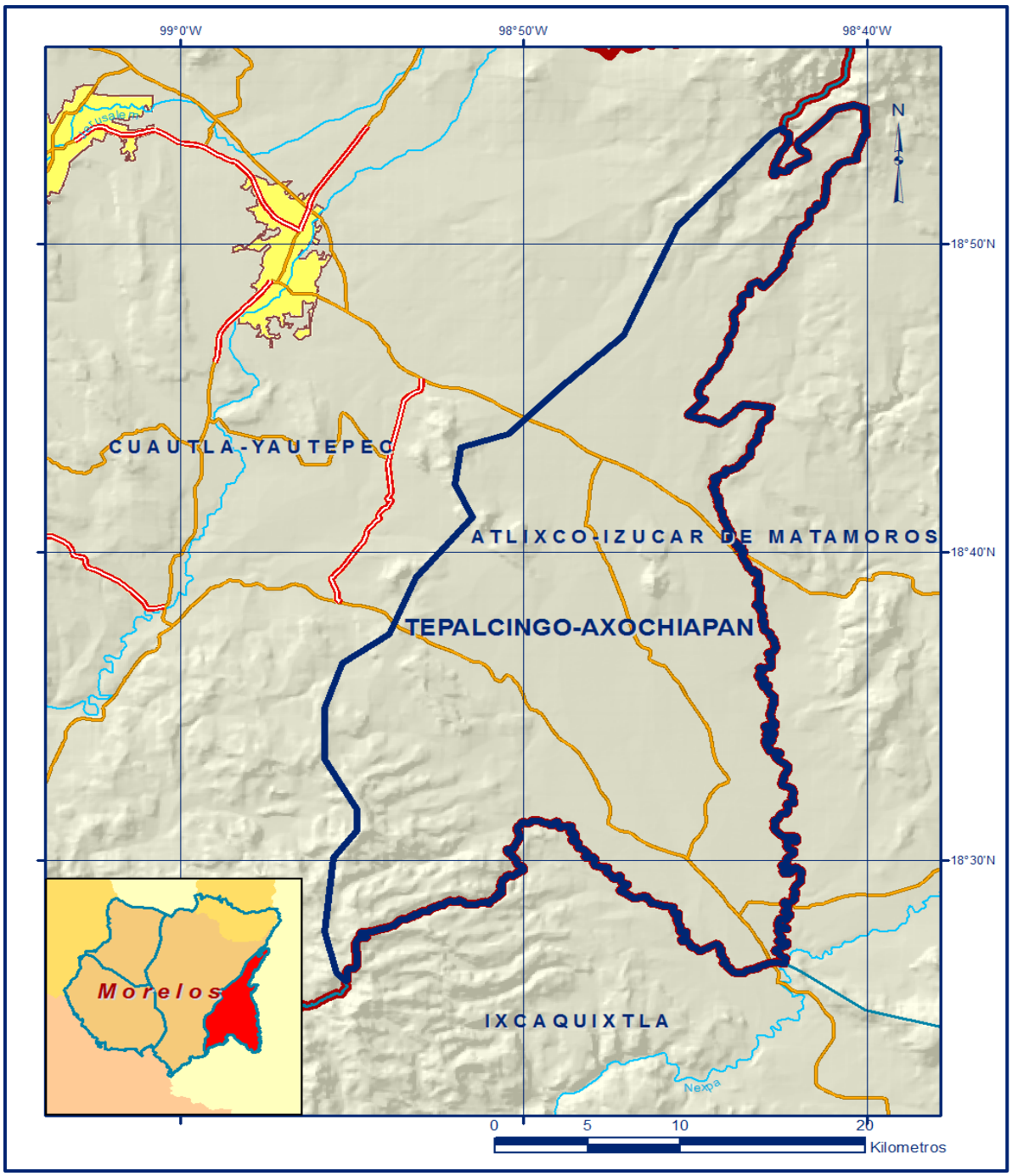


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1704 TEPALCINGO-AXOCHIAPAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	42	25.9	18	53	46.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	98	42	23.3	18	26	40.4	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	98	55	10.0	18	26	5.4	
4	98	55	28.0	18	26	23.2	
5	98	55	48.8	18	27	40.9	
6	98	55	33.2	18	30	6.0	
7	98	54	51.8	18	30	57.8	
8	98	54	51.8	18	31	39.2	
9	98	55	48.8	18	33	17.6	
10	98	55	48.8	18	34	56.1	
11	98	55	17.7	18	36	24.1	
12	98	53	54.8	18	37	21.1	
13	98	53	8.2	18	39	9.9	
14	98	51	29.7	18	41	9.1	
15	98	52	0.8	18	42	11.2	
16	98	51	50.5	18	43	23.7	
17	98	50	27.6	18	43	49.6	
18	98	48	44.0	18	45	33.3	
19	98	47	5.5	18	47	1.3	
20	98	45	32.3	18	50	33.7	
21	98	42	46.5	18	53	35.0	
1	98	42	25.9	18	53	46.4	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tepalcingo-Axochiapan pertenece al Organismo de Cuenca Balsas. *Su territorio completo se encuentra totalmente vedado. La porción norte está sujeta a la disposición del "Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites del Distrito de Riego número 16, del Estado de Morelos"* publicado en el diario Oficial de la Federación (DOF) el 23 de junio de 1960 esta veda se clasifica del tipo III la cual establece que Zonas de veda en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La porción sur del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones del "*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona no vedada del estado de Morelos, para el mejor control de las extracciones, uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo de dicha región*" publicado en el diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de julio de 1973, esta veda es de tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos y de abrevadero.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. No existe Distrito o Unidad de Riego alguno, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional, a continuación, se mencionan los más importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA ZONA DE TEPALCINGO-AXOCHIAPAN EN EL ESTADO MORELOS, realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA) en 1980 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El estudio tuvo como objetivos el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero, definir su geometría, cuantificar su disponibilidad, conocer la calidad y distribución del agua subterránea y recomendar las áreas más favorables para la perforación de pozos exploratorios y de explotación.

Para ello, se realizaron actividades de campo como censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, piezometría, nivelación de brocales, ejecución pruebas de bombeo, censo de aprovechamientos, toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos y reconocimientos geológicos.

Concluye que el volumen de agua susceptible de ser aprovechado se reduce a la recarga media anual que recibe el acuífero, ya que un valor mayor induciría efectos perjudiciales y que la profundidad de los niveles del agua subterránea y la baja permeabilidad del subsuelo limitan la recarga vertical. La extracción para esa fecha ya rebasaba la magnitud de la recarga y esto se traducirá en un abatimiento paulatino de los niveles del agua subterránea.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE CUERNAVACA, CUAUTLA-YAUTEPEC, ZACATEPEC Y TEPALCINGO-AXOCHIAPAN, ESTADO DE MORELOS, realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V, en 2000, para la Comisión Nacional del Agua. Mediante este estudio se propone y define la red de pozos piloto para medición piezométrica. Para el acuífero Tepalcingo-Axochiapan dicha red quedó constituida por 30 pozos, con la piezometría correspondiente al 2000 fue posible elaborar las configuraciones el nivel estático.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN EL ACUÍFERO TEPALCINGO-AXOCHIAPAN EN EL ESTADO MORELOS, realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 2006. El objetivo de este estudio fue la actualización del balance de agua subterránea y sustentar técnicamente la sobreexplotación del acuífero y su disponibilidad. Entre sus actividades destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, piezometría, nivelación de brocales y ejecución de pruebas de bombeo; mediante las cuales platea el balance de aguas subterráneas para determinar su recarga media anual, la cual fue evaluada en 29.1 hm^3 anuales.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS CUERNAVACA, CUAUTLA-YAUTEPEC, TEPALCINGO-AXOCHIAPAN Y ZACATEPEC, EN EL ESTADO DE MORELOS, elaborado por la Universidad Autónoma Chapingo, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el acuífero Tepalcingo-Axochiapan se localiza en la zona de transición del borde septentrional del Eje Neovolcánico, su porción noreste se encuentra situada en la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac y la porción suroeste en la Subprovincia Sierras del Sur de Puebla.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por el predominio de derrames basálticos y numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución, sugieren la idea de estar situados en fosas tectónicas. Presenta una forma alargada que se extiende desde la región del Volcán Ceboruco, en el Estado de Nayarit al poniente, hasta el Pico de Orizaba al oriente; está conformado por un gran número de estratovolcanes y conos cineríticos entre los cuales se han formado valles que han sido rellenados por depósitos volcánicos y lacustres.

Entre ellos destacan los volcanes de Colima, Tancítaro, Zinaltécatl (Nevado de Toluca), Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (La Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos a lo largo del paralelo 19°.

La Subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, comprende la mayor parte del acuífero y toda la porción norte y el este del estado. Su área es de 2,169 km^2, que representan el 44.5 % de la superficie estatal. Su rasgo característico es la presencia de sierras de laderas escarpadas formadas por la intensa erosión de flujos de lahares.

En el extremo noreste el límite estatal se extiende en una angosta franja por las faldas del Volcán Popocatépetl hasta su cráter.

La Subprovincia Sierras del Sur de Puebla, localizada al suroeste del acuífero, penetra al estado en su porción centro-sur, ocupa el 12.2 % (594.6 km^2) de la superficie total estatal y está representada por unas sierras volcánicas de laderas escarpadas y disectadas, cuya altitud supera los 1,650 msnm.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante es el cálido-subhúmedo que se caracteriza por sus lluvias en verano, entre los meses de julio y septiembre, y un 5 % de lluvia invernal, con respecto a la media anual. Hacia el valle de Zacualpan de Amilpas, se presenta un clima templado y hacia Jonacatepec, donde se presenta un cambio de pendiente, el clima varía a semicálido.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **893 mm** y **20.3 °C** respectivamente.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de octubre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, subregión hidrológica “Alto Balsas”, en la cuenca del Río Atoyac. Su corriente superficial más importante es el río Nexapa, que escurre en dirección norte sur. La región hidrológica comprende el 6% de la masa continental del territorio mexicano, entre los paralelos 17 00' y 20 00' de latitud norte y los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste, abarca porciones de varias regiones económicamente importantes del centro-occidente y centro-sur de México, a través de ocho estados de la república.

En el área que cubre el acuífero no existe infraestructura hidráulica para almacenar los escurrimientos superficiales.

3.4 Geomorfología

Los rasgos morfológicos que muestra la zona del acuífero Tepalcingo-Axochiapan, son reflejo de las características litológicas y tectónicas de las formaciones existentes: rocas sedimentarias marinas del Cretácico, sedimentos clásticos del Terciario Inferior, volcánicas del Terciario Medio y Superior, que en general definen barrancas profundas, lomeríos redondeados y cordones de cimas aplanadas.

Los tipos de drenaje varían de paralelos a dendríticos, teniendo su máxima expresión en los productos volcánicos del Popocatépetl y en las rocas de los grupos Ixtlilco y Tepexco.

Del paisaje morfológico sepultado existen ventanas-testigos, tales como los afloramientos de los troncos intrusivos de Tlaica cerca del poblado de Jonacatepec. Las formas de relieve son el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas.

Los límites geomorfológicos de la zona acuífera de los valles de Tepalcingo-Axochiapan son: al norte la Sierra Nevada (Volcán Popocatépetl), al sur la Sierra du Huautla; al poniente con el acuífero de Cuautla-Yautepec y al oriente con una serie de pequeñas elevaciones que lo separan del acuífero vecino Atlixco-Izúcar de Matamoros, del Estado de Puebla.

El Volcán Popocatépetl es la mayor altitud (5,452 msnm) y una de las principales zonas de recarga del acuífero Tepalcingo–Axochiapan. El aparato volcánico está constituido por una serie de derrames o coladas de lava, de alta permeabilidad primaria y secundaria producto del intenso fracturamiento y de la presencia de escorias volcánicas (tezontle) que permiten la rápida infiltración del agua de lluvia.

El desnivel del Volcán Popocatépetl con el valle de Tepalcingo es de 4,152 metros, en aproximadamente 60 km, que se refleja en una expresión geomorfológica de gran contraste, dando lugar a la formación de lomeríos ondulantes con depósitos aluviales de los valles del Plan de Amilpas (1,500 msnm) y la continuación de este, el valle de Tepalcingo-Axochiapan (1,100 msnm) con pendientes en dirección sur y suroeste.

El patrón de drenaje que predomina en la superficie del acuífero es el dendrítico, aunque en la parte alta está influenciado por el volcán Popocatépetl, en donde es radial y posteriormente, conforme disminuye la altitud, cambia a dendrítico al sur en la zona de Tepalcingo-Axochiapan.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial muestra unidades litológicas principalmente de origen sedimentario y volcánico, producto de una sucesión de acontecimientos naturales que modelaron la corteza terrestre; constituida de forma general por rocas sedimentarias marinas, continentales y rocas ígneas (figura 2). Desde el punto de vista tectónico, la región se ubica en el límite entre los Terrenos Guerrero y Mixteco (Campa M.F,. 1981). El Terreno Guerrero se encuentra conformado por basaltos y andesitas en coladas y almohadillas.

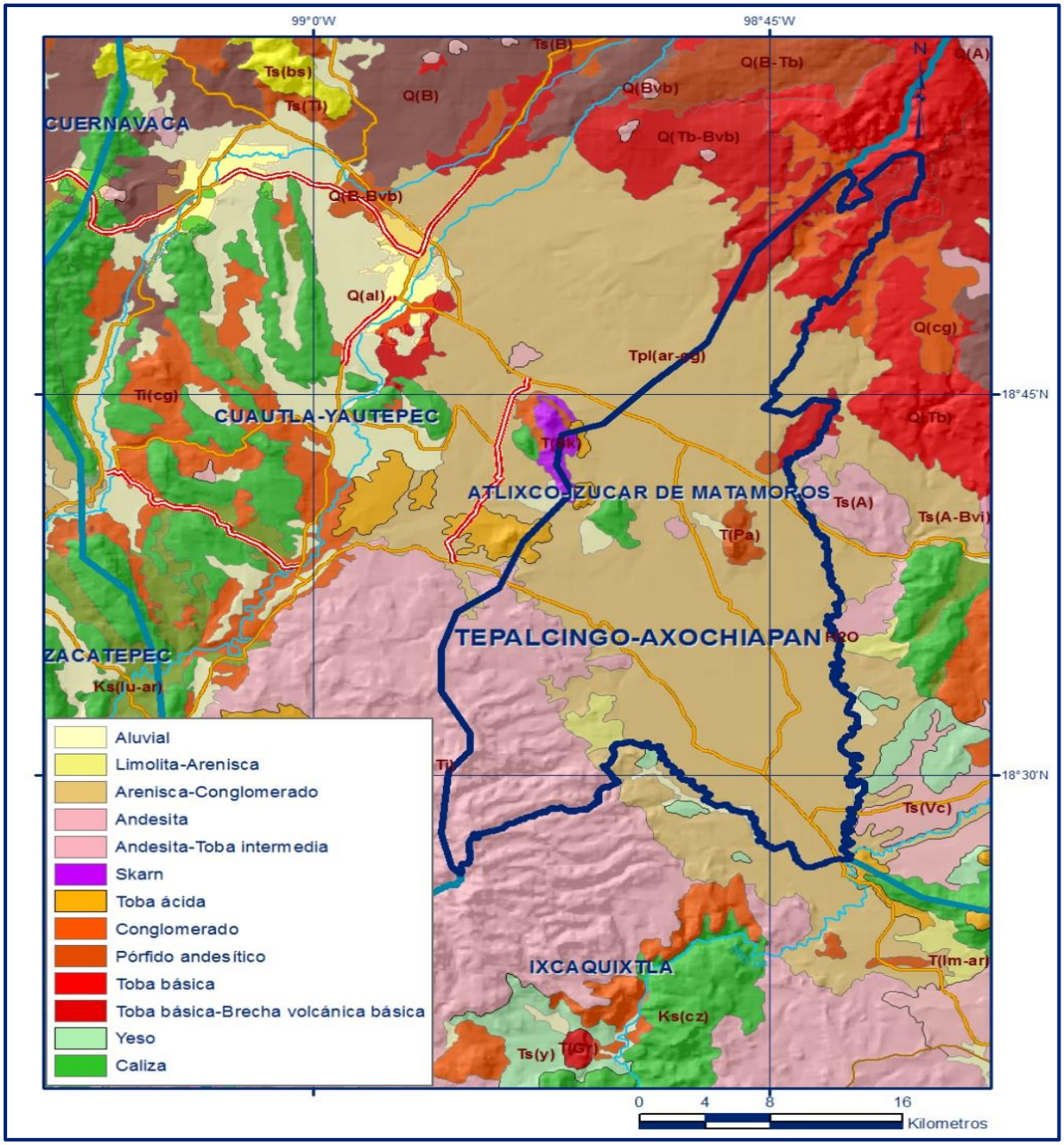


Figura 2. Geología general del acuífero

La edad de esta secuencia es cretácica, aunque podría ser jurásica superior; está cubierta transicionalmente por conglomerados, brechas volcánicas, grauvacas y pelitas tobáceas. El acuífero Tepalcingo-Axochiapan se encuentra localizado en el terreno Mixteco, que se caracteriza por contar con un basamento metamórfico Paleozoico, con una cubierta sedimentaria con sedimentos carbonatados y terrígenos depositados en un medio ambiente de plataforma y cuenca; por la cubierta volcánica que comparten es muy probable que a finales del Cretácico Superior o Terciario Paleógeno haya ocurrido la acreción de estos terrenos.

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica de las unidades que afloran es la superficie cubierta por el acuífero comprende edades del Cretácico al Reciente. A continuación, se describen de la más antigua a la más reciente:

MESOZOICO CRETÁCICO

Formación Morelos

Fue propuesta por Carl Fries en 1960 para designar una gran secuencia de horizontes de calizas y dolomitas, de edad cretácica que afloran en gran parte del estado de Morelos y zonas circunvecinas, sobre todo en los límites de los estados de México y Guerrero.

Según Fries, dentro de esta formación se pueden identificar plenamente dos miembros; el primero carbonatado, representado por estratos potentes de caliza y dolomitas y el segundo llamado anhidrita por contener estratos de este material.

En términos generales esta formación consta esencialmente de una sucesión de horizontes calcáreos y dolomíticos con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos y lentes, la parte más antigua está representada por el miembro Anhidrita.

El color cambia de una capa a otra, variando de gris claro a negro, estas últimas deben su color a la mayor abundancia de materia carbonosa; de manera general los estratos presentan un espesor que varía de 20 a 60 cm. Su espesor medido en varias secciones en el estado varía entre 450 y 900 m.

Aflora al norte del poblado Atotonilco, en donde constituye el anticlinal de Tlaica. Su edad corresponde al Albiano-Cenomaniano.

Formación Cuautla

El nombre de la Formación Cuautla fue propuesto por Fries en el año de 1960 para designar una secuencia de calizas que se presentan en capas delgadas y medidas en las serranías bajas al poniente de la ciudad de Cuautla, Morelos. Consta de tres facies predominantes: una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación medio a gruesa tipo de banco calcáreo; una sucesión más delgada de capas de caliza laminares de estratificación delgada y una sucesión muy delgada de capas de caliza clásica de estratificación delgada a mediana.

La facies que predomina en la zona es la caliza densa en estratos gruesos o bien en algunas ocasiones masiva compuesta por calcilimolita y calcarenita de tipo banco calcáreo en estratos gruesos, frecuentemente algunos de ellos presenten nódulos de pedernal.

En general, la secuencia es gradual y con cierta variación lateral, su base está constituida por conglomerados calcáreos, cuyos espesores varían desde 1 hasta 10 m.

El espesor de esta formación es de 750 m, medidos en la Sierra San Gabriel y su edad asignada por Fries es del Cenomaniano-Turoniano. Las rocas de esta formación y las de la Formación Morelos fueron intensamente deformadas, por efectos orogénicos, produciendo fracturamiento que en muchas localidades fue sellado por calcita.

Formación Mexcala

También propuesta por Fries (1960) para designar una sucesión de estratos de areniscas, limolitas y lutitas que se encuentran sobreyaciendo en forma concordante a la Formación Cuautla. La localidad tipo se ubica en las proximidades del poblado Mexcala, en Guerrero.

Es la unidad más joven de la secuencia de rocas sedimentarias marinas del Cretácico. Sus afloramientos se extienden en el estado de Morelos y otros estados vecinos como el de México, Puebla y Oaxaca.

Está constituida principalmente, por lutitas y limolitas, con escasos horizontes de areniscas que hacia la base se hacen más calcáreas.

La intensa erosión a la que ha estado sujeta, propició el depósito de rocas paleógeno-neógenas en forma discordante. Cronológicamente se correlaciona con las formaciones Malpaso, Petlalcingo, Soyatal y Agua Nueva.

Debido al intenso plegamiento que exhibe, no se ha podido establecer una secuencia litológica detallada ni conocer su espesor real; sin embargo, se ha reportado un espesor hasta superior a 1000 m.

Por su contenido fósil, Fries le asignó una edad correspondiente al Conaciano Campaniano.

TERCIARIO

Grupo Balsas

Los primeros depósitos del Paleógeno-Neógeno que descansan sobre las rocas cretácicas consisten en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres, no marinos, que se denomina Grupo Balsas. Se le ha designado como Grupo, ya que las unidades que lo conforman tienen litología muy variable, cada una de las cuales podría constituirse, por si misma, como unidad con características propias, aunque en algunos lugares presenta facies que se interdigitan y en otras quedas superpuestas.
El nombre fue propuesto por Fries en 1960 para designar a una gran variedad de unidades litológicas que afloran en la cuenca del rio Balsas, este grupo incluye una gran diversidad de materiales como son anhidritas, yesos, calizas lacustres, conglomerados calcáreos y volcánicos, areniscas, materiales tobáceos, derrames ígneos, brechas etc., su grado de compactación es igualmente variable por lo que no es factible determinarlo, dependiendo del material y tipo de depósito.

El grupo Balsas en la zona de estudio se encuentra descansando sobre las formaciones cretácicas, principalmente sobre la Formación Mexcala y en algunas ocasiones sobre la Formación Cuautla y la Formación Morelos en discordancia angular.

Aflora en una amplia zona al NE y SE del área de estudio. Hacia el noreste incluye conglomerados de color rojizo con fragmentos semi-redondeados de caliza proveniente de las formaciones Morelos y Cuautla. En el sureste predominan tobas híbridas de color crema, las cuales tienen pequeños fragmentos angulosos y sub-redondeados de caliza y lutitas, incluidos en una matriz tobacea de tipo riolítico de grano muy fino, depositadas en un medio lacustre. Presenta estratificación en capas de hasta de 2 metros de espesor.

Su espesor es muy variable, del orden de 600 m y su edad se asigna al Eoceno–Oligoceno. Subyace a la Riolita Tilzapotla y a la Formación Tlaica y se correlaciona con el Grupo El Morro.

Riolita Tilzapotla

El nombre de Riolita Tilzapotla fue propuesta por Carl Fries para designar a los afloramientos de material tobáceo, derrames y brechas de composición riolítica que afloran hacia la porción sur del río Amacuzac.

Es una de las primeras rocas volcánicas depositadas sobre el Grupo Balsas o, en su ausencia, sobre las rocas marinas cretácicas; en su mayor parte, se encuentra constituida por rocas ignimbríticas; sin embargo, dentro de ella se han registrado localmente derrames.

Su edad es del Oligoceno Tardío de acuerdo con determinaciones radiométricas y su espesor es sumamente variable, alcanzando en algunas localidades hasta 500 m.

Formación Tlaica

Con el nombre de Formación Tlaica se conoce a las rocas que forman la base de la secuencia volcánica del Paleógeno-Neógeno, constituida, principalmente, por ignimbritas y, en algunos casos, por brechas volcánicas que descansan sobre el Grupo Balsas. De forma masiva y compacta, afloran a medio kilómetro del poblado de Tlaica (de donde toma su nombre) y en el cerro El Colorado.

El espesor es muy variable, en los cerros El Colorado y Cacalotes, ubicados al sur y sureste del poblado de Tlaica, se ha logrado identificar su espesor máximo aproximado de 200 m; mientras que, al noroeste, norte y oriente de la zona, se acuña. Debido a que esta formación y la Riolita Tilzapotla presentan características litológicas muy semejantes, se le ha asignado una edad del Oligoceno Superior.

Rocas Metamórficas

Están presentadas por rocas de metamorfismo de contacto, skarn y en menor proporción mármol, que se originaron por cuerpos intrusivos posteriores al Grupo Balsas, conocidos como Diorita Xalostoc. Afloran al oeste del acuífero, en el límite con el acuífero Cuautla-Yautepec, al oeste del poblado Tlaica.

Grupo Tepexco

Fue descrito por Fries en 1960 en la población de Tepexco; está formado por andesitas y brechas andesíticas, parecida al Grupo Ixtlilco sólo que las rocas presentan un color más oscuro; presenta estructura masiva.

En este grupo las rocas ígneas intrusivas, cuyas áreas de afloramiento son muy restringidas, son rocas de naturaleza impermeable (granodioritas) y se encuentran en el área de estudio, cerca del poblado de Jonacatepec y son denominados “Troncos Ígneos de Chalcatzingo”.

Grupo Ixtlilco

Este grupo está conformado por derrames volcánicos, con interestratificación de tobas híbridas; los derrames presentan diferentes colores y texturas en tanto que las tobas muestran un color que varía de gris a rojizo.

Afloran hacia la porción sur y norte del poblado El Salitre, al noreste de Chinameca y al sur de Huitzililla, descansando sobre la Formación Tlaica; su cima está erosionada por lo que sólo pudo medirse un espesor incompleto de 500 m. Su edad corresponde al Mioceno-Plioceno.

Formación Cuayuca

Consiste en una secuencia de capas lacustres de yeso que descansan sobre capas arcillosas. El yeso es de color crema claro en capas de unos 30 cm de espesor, es suave y poco plegado. La mayor parte de los yesos son explotados comercialmente. Su principal afloramiento se encuentra al norte de Ahuehutzingo.

Otros pequeños afloramientos de yeso se localizan en las cercanías de Teotlacico y Tzicatlán. Por su posición estratigráfica se considera que esta formación tiene una edad Mioceno. Sus afloramientos se restringen a la zona comprendida entre las poblaciones Tepalcingo y Axochiapan.

Formación Tlayecac

Nombre propuesto formalmente por Carl Fries (1966), tomando como localidad tipo a las rocas que afloran en el cerro El Mirador que se ubica al norte del poblado de Tlayecac.

La unidad se encuentra aflorando en toda la porción meridional del Volcán Popocatépetl cuyos límites occidentales se localizan al oriente de Cuautla, Morelos; al sur aflora cerca de Jonacatepec y al oriente hacia la porción occidental del Estado de Puebla. Algunos afloramientos, descansan sobre la Formación Cuautla, Grupo Tepexco y granodiorita Jantetelco.

Esta formación se interdigita con la Formación Popocatépetl y con una parte del Grupo Chichinautzin. Está constituida principalmente por material muy mal clasificado, depositado por flujos de escombros y corrientes de lodos (lahares) del Volcán Popocatépetl; se pueden clasificar como brechas vulcanoclásticas.

El material no está cementado, no obstante, está muy compactado y suele expresarse geomorfológicamente como acantilados en los flancos de las barrancas. Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad Plioceno Medio- Pleistoceno Medio.

CUATERNARIO

Formación Popocatépetl

Materiales volcánicos que constituyen el cuerpo del volcán Popocatépetl, está constituida por materiales ígneos extrusivos de diferente composición, dando lugar a la presencia de coladas basálticas, andesíticas y riodacíticas, con intercalaciones de materiales piroclásticos.

Originalmente fue definida como Riodacita Popocatépetl por Fries (1966), quien incluyó con este nombre a los derrames lávicos emitidos por el Volcán Popocatépetl, comprende las rocas que forman la estructura principal del volcán.

En 1968, Schlaepfer restringe el nombre Riodacita Popocatépetl para los productos volcánicos más recientes que forman el cráter actual y los derrames volcánicos que cubren principalmente la ladera sur, los cuales se correlacionan con los últimos derrames ocurridos en el volcán Iztaccíhuatl. Mooser et al. (1974) incluye al Popocatépetl en lo que denominó como Sierra Nevada y le asigno una edad Plioceno Tardío. En 1985, Carrasco-Núñez nombra a la Riodacita Popocatépetl como Formación Popocatépetl dividiéndola en dos miembros.

Aflora en el aparato volcánico y se extiende hasta varios kilómetros a su alrededor. En ningún sitio de la ladera sur se observa el contacto inferior de esta unidad, no se sabe de manera certera sobre que formaciones descansa, pero se considera que se interdigita con la parte superior del Grupo Chichinautzin y con la Formación Tlayecac (Fries 1966). Sin embargo, en la ladera norte se observa cubriendo discordantemente a la Formación Iztaccíhuatl.

Miembro Inferior

Aflora en las zonas inferiores del cono principal, extendiéndose irregularmente en torno a él y llegando hasta el límite con la zona boscosa, aproximadamente sobre la cota 3,700 m.s.n.m. Se caracteriza por la presencia de andesitas de color gris claro de textura afanítica, aunque hacia el sur se vuelve ligeramente porfídica, se presenta de forma masiva con capas poco definidas.

No se ha podido observar su contacto inferior, pero se infiere que podría alcanzar un espesor de 800 m. Se considera que su edad debe de ser Pleistoceno tardío.

Miembro Superior

Está compuesto por andesita porfídica de tendencia ácida, aunque de color oscuro, que se encuentra intercalada con material piroclástico pobremente consolidado. Debido a la alta viscosidad de las coladas, estas no se extendieron más allá de la parte superior del cráter. Sin embargo, los productos piroclásticos se encuentran dispersos ampliamente entorno al cráter. Los flujos piroclásticos se pueden observar en los valles cercanos al cráter. El espesor de las coladas de lava alcanza 450 m considerando las partes que pudieron desaparecer debido a la destrucción de la cima del cráter.

Depósitos Clásticos Continentales

Son materiales de tipo conglomerático, estratificados, constituidos por fragmentos de basaltos y andesitas, débilmente empacados en arena arcillosa, su espesor es variable aumentando hacia la porción central, en donde llega a ser superior de los 180 m.

Aluvión

Consiste de clastos con textura arenosa, de granulometría media a gruesa y, en menor proporción, gravas que provienen de las rocas que afloran en la zona. Localmente, se encuentra intercalado con arcillas, presenta escaso espesor y está restringido a las vegas de los ríos y arroyos.

4.2 Geología estructural

A través del tiempo geológico, el estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, actividades que han dado lugar a la presencia de una variedad de geoformas, de manera simple se pueden clasificar en sierras y valles, las primera son producto de una intensa actividad tectónica y las segundas son el resultado de las diferentes fuerzas modeladoras de la superficie terrestre.

La Sierra Nevada está relacionada con una gran falla que divide la República Mexicana en dos, tiene varias implicaciones, en el presente estudio su enfoque es desde el punto de vista hidrológico.

La aparición de este aparato volcánico ocasionó que el drenaje sea de tipo radial, una fracción de esta ladera es hacia Morelos y la restante hacia los estados de Puebla al oriente y México al norte y poniente.

Existen además lineamientos estructurales en el suroriente de la zona, fuera del área de estudio en los límites con el Estado de Puebla, se presentan en las rocas sedimentarias marinas estructuras de pliegues laramídicos en rocas cretácicas. Estos pliegues están recostados hacia el sureste y tienen una orientación NE-SW, con buzamientos hacia el noreste. Otros rasgos estructurales sobresalientes, son los cuerpos ígneos intrusivos que forman los Cerros Gordo o "Cabeza de Chango" y Peñón de Jantetelco, ubicados en la porción nororiental del acuífero.

Finalmente se puede concluir que la geología estructural determina el tipo de red hidrográfica y la dirección de flujo de las aguas subterráneas, dando lugar a una dirección preferencial en sentido Norte-Sur, como lo manifiestan los ríos Nexapa en Puebla y Tepalcingo, San Francisco y la barranca Amatzinac en Morelos.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero regional denominado acuífero superior, está constituido principalmente por depósitos clásticos continentales de origen volcánico del tipo conglomerático con intercalaciones de basaltos y andesitas débilmente empacados en arenas y arcillas (Formación Tlayecac), y por los depósitos aluviales de los ríos Amatzinac y Tepalcingo.

Ambos depósitos de porosidad primaria intergranular, rellenan los valles construccionales con espesores variables que alcanzan hasta 200 m; constituyendo el acuífero principal, que es captado por los pozos y norias existentes.

Subyaciendo al acuífero superior se presentan materiales de muy baja permeabilidad pertenecientes a la Formación Cuayuca que constituyen el basamento del acuífero principal en explotación. Esta formación geológica funciona como un "acuitardo" o capa semiconfinante de un segundo acuífero o acuífero inferior con porosidad por disolución, constituido por calizas de la formación Morelos y Cuautla, que pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por las rocas arcillosas de la Formación Mexcala.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por depósitos clásticos continentales de la Formación Tlayecac que rellenaron los valles construccionales con espesores variables. Esta unidad está subyacida por las rocas de baja permeabilidad de la Formación Cuayuca, que funciona como acuitardo.

La porción inferior se aloja a mayor profundidad en rocas carbonatadas de las formaciones Morelos y Cuautla, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución y condiciones de confinamiento o semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se llevaron a cabo 4 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Adicionalmente existe información de pruebas realizadas en estudios anteriores.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se puede establecer que los valores de transmisividad varían de **0.10×10^{-3} m^2/s a 12.0×10^{-3} m^2/s** (8.64 m^2/día a 1,036.8 m^2/día).

La variación de la transmisividad sigue un comportamiento bien definido, los valores más bajos se encuentran en la porción norte (valle de Jonacatepec), aumentando gradualmente hacia el sur (valle de Axochiapan). Con respecto a la conductividad hidráulica los valores oscilan entre **4.05×10^{-6} a 4.05×10^{-5} m/s** (0.35 m/día y 3.5 m/día).

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, mediante, un balance de aguas subterráneas alterno, se estimó un valor de 0.01.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información piezométrica para los años 2004 y 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, se observa que la profundidad media al nivel estático varía de 20 a 60 m, aumentando gradualmente del centro del valle y de las inmediaciones de río y arroyos, por efecto de la topografía, hacia las laderas de las sierras que delimitan el acuífero.

Los valores más profundos, mayores a 50 m, se registran en la porción central, y los más someros en las localidades Chalcatzingo y Quebrantadero (figura 3).

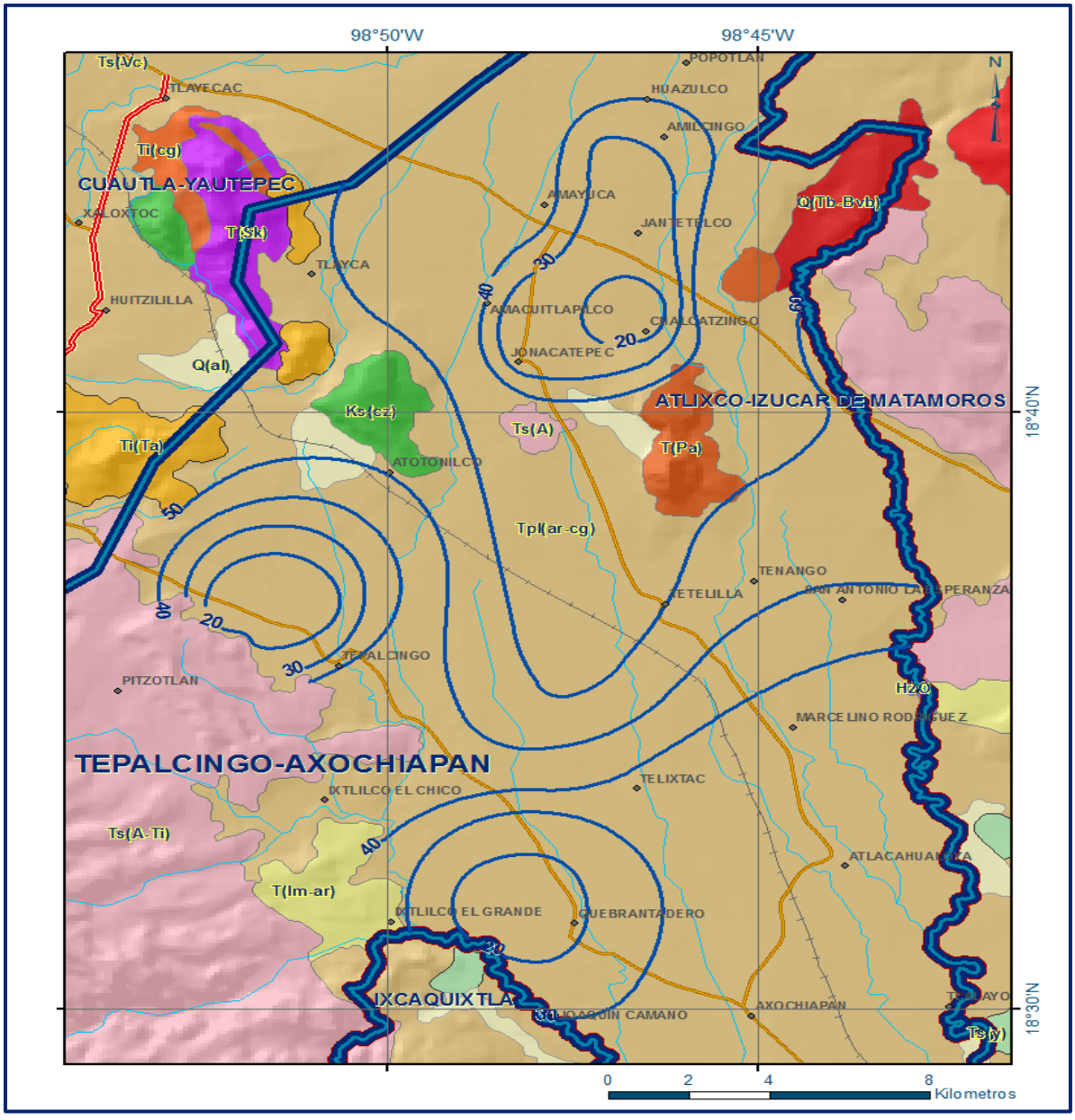


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, presenta valores que varían de 1450 a 1000 msnm, descendiendo gradualmente desde el extremo norte hacia el sur, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y la dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur, alimentada por los aportes provenientes de la porción occidental.

Los valores más altos se presentan entre Amilcingo y Jantetelco y los más bajos entre Quebrantadero y Axochiapan (figura 4).

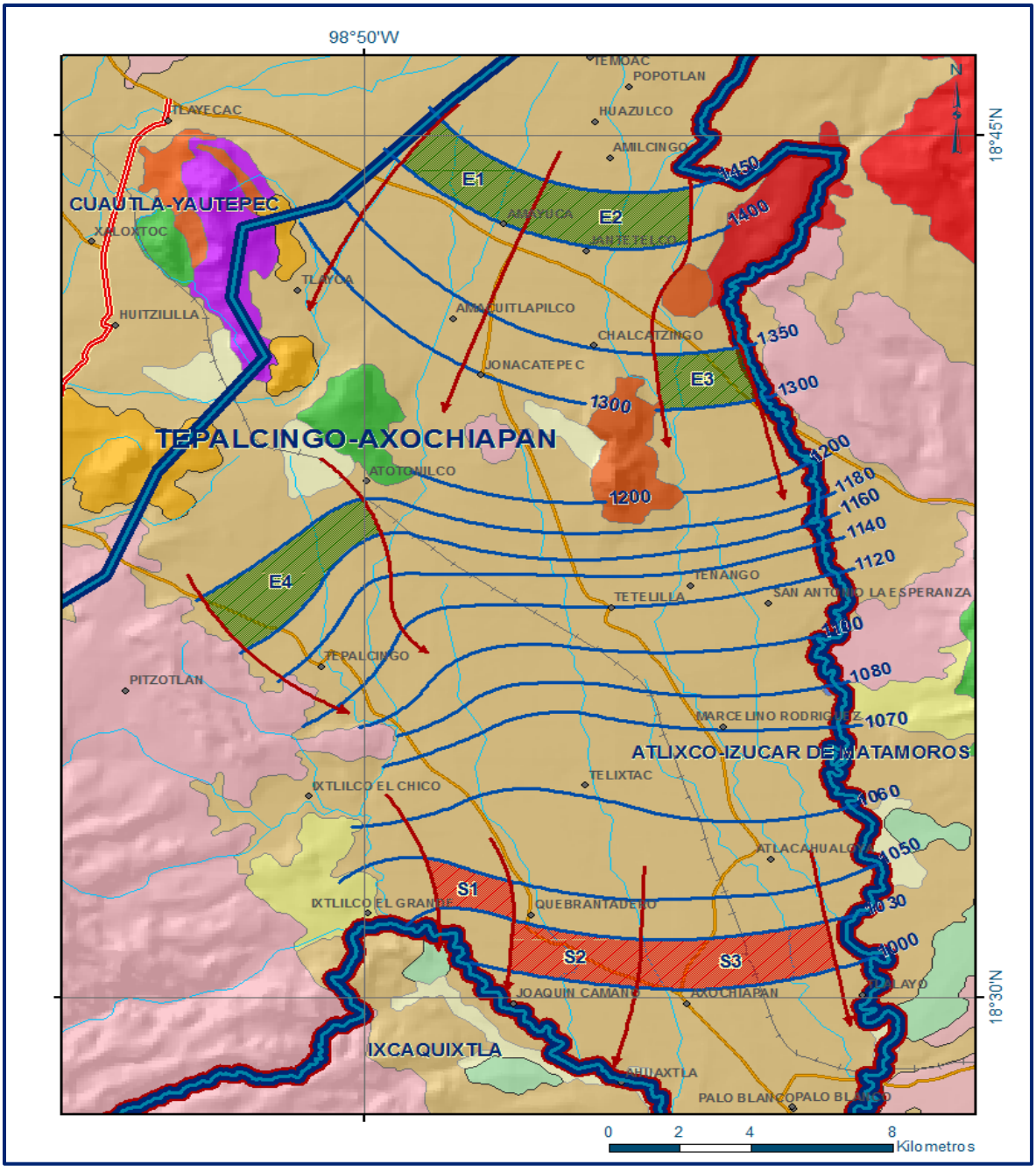


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, para el periodo 2004-2010, se registraron abatimientos de 1 a 30 m, con un promedio de 6 m, que representan 1 m anual. La zona que registra mayores abatimientos, de 10 a 30 m, se localiza al sur del acuífero, entre los poblados Ixtlilco El Grande y Telixtac; los menores se presentan al norte (figura 5). Al sur de San Antonio La Esperanza se presenta un cono de abatimiento de 20 m.

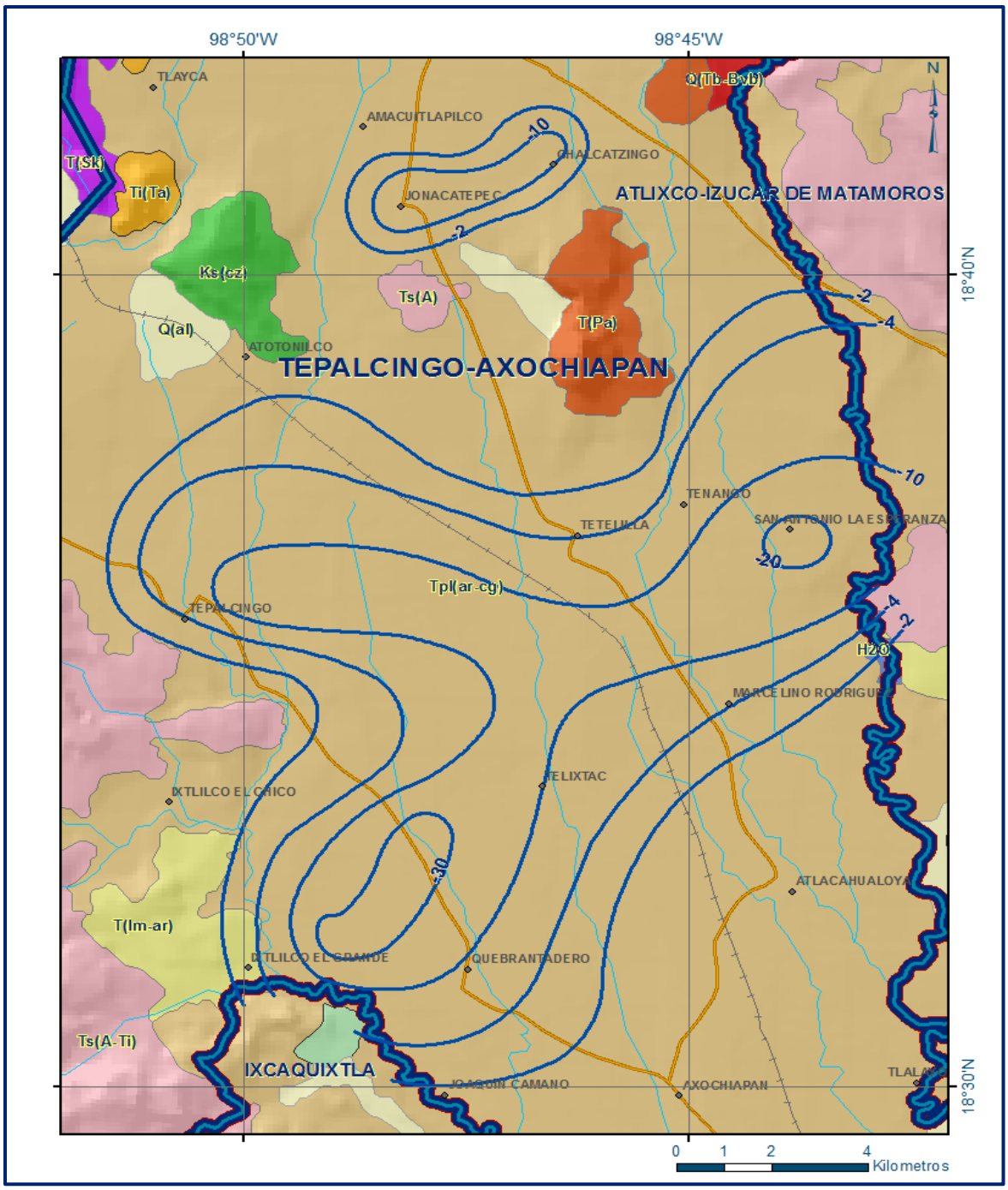


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2004-2010)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 16 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron: Temperatura (°C), Potencial de Hidrogeno (pH), iones principales conductividad eléctrica (µs/cm) y sólidos totales disueltos (mg/l), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Con respecto a los sólidos totales disueltos (STD), los valores varían entre 180 y 830 ppm.

Las concentraciones más bajas se ubican en la porción norte del área, en las inmediaciones de los poblados de Tlacotepec, Zacualpan, Temoac, Huazulco, Amayuca y Jantetelco, y las más altas en la porción sur; entre los poblados Quebrantadero y Axochiapan.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2010, apoyado con la información del REPDA, se registraron un total de 321 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 203 son pozos, 106 norias y 12 manantiales. Del total de obras, 277 se encuentran activas y 44 inactivas; 215 son para uso agrícola, 45 para uso público-urbano, 52 para actividades domésticas y 9 para uso industrial.

El volumen de extracción estimado asciende a 37.4 hm^3/año; de los cuales 30.3 hm^3/año (81.0%) se destinan al uso agrícola, 6.1 hm^3/año (16.3%) para uso público urbano, 0.9 hm^3/año (2.4%) para uso múltiple y 0.1 hm^3/año (0.3%) para otros usos.

Adicionalmente, a través de manantiales se descarga un volumen estimado de **5.2 hm^3 anuales,** destinados al uso doméstico-abrevadero y agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2004-2010, en superficie de 330 km^2 del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero

en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los ríos 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 riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

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:

$$\mathbf{Rv + Eh + Ri – B – Sh – Dm = \pm \Delta V(S)} \quad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Rv = Recarga vertical;
Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal;
Ri = Recarga inducida;
B = Bombeo;
Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

Dm = Descarga de manantiales;
ΔV(S)=Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

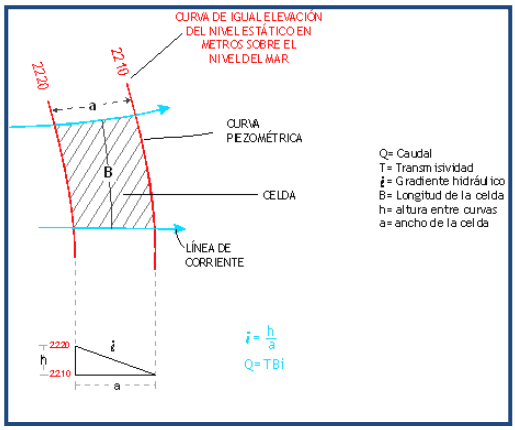
La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para 2010 (figura 4).

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

$$Q = B * i * T$$

Donde:
Q = Caudal (m^3/s)
B = Longitud de la celda (m)
i = Gradiente Hidráulico (adimensional)
T = Transmisividad (m^2/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada una de los canales establecidos, en la tabla 2 se puede observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **21.5 hm³/año.**

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

CANAL	LONGITUD L (m)	ANCHO B (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	3855	1835	50	0.0272	0.001	0.1050	3.3
E2	4500	2000	50	0.0250	0.001	0.1125	3.5
E3	2400	1835	50	0.0272	0.001	0.0654	2.1
E4	5550	1665	20	0.0120	0.006	0.4000	12.6
						Total entradas	**21.5**

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, se aplicó un balance hidrometeorológico para obtener un coeficiente de infiltración. Para este caso su valor es de 7.6% (OCB, 2012).

El volumen extracción de agua subterránea para uso agrícola es de 30.3 hm^3 anuales; si consideramos que el 7.6% del volumen aplicado al uso agrícola retorna como recarga efectiva al acuífero, obtenemos su valor es de 2.3 hm^3/ año. Por otra parte, al aplicar el 7.6% al volumen de agua para uso público-urbano de 6.1 hm^3/ año, arroja un valor de infiltración de 0.5 hm^3/año. Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida asciende a **2.8 hm^3/año.**

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), las descargas de manantiales (Dm) y bombeo (B). No existen descargas por evapotranspiración ni descarga por flujo base de los ríos.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo de los aprovechamientos e hidrometría su valor es de **37.4 hm³/año.**

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **7.2 hm³/año.**

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

CANAL	LONGITUD L (m)	ANCHO B (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
S1	2165	1335	20	0.0150	0.002	0.0649	2.0
S2	4000	1665	30	0.0180	0.001	0.0721	2.3
S3	5665	1835	30	0.0163	0.001	0.0926	2.9
					Total salidas		7.2

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con los aforos, el volumen promedio de descarga de los manantiales asciende a **5.2 hm³ anuales**, que equivalen a un caudal 165 lps.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo 2004-2010, mostrada en la figura 5.

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico de Sy = 0.01, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = S * A * h$$

Donde:

ΔVS= Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2004-2010 se pueden observar en la tabla 4. El volumen anual del cambio de almacenamiento asciende a -14.3 hm^3 que representan un promedio anual de -2.4 hm^3/año. **ΔV(S) = -2.4 hm^3 anuales.**

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2004-2010)

Evolución (m)	Abatimiento promedio (m)	Area (km^2)	S	ΔV(S) (hm^3/a)
-2 a -4	-3	43.3	0.01	-1.3
-2 a -10	-6	5.3	0.01	-0.3
-4 a -10	-7	58.2	0.01	-4.1
-10	-10	21.7	0.01	-2.2
-10 a -20	-15	13.8	0.01	-2.1
-20	-20	1.2	0.01	-0.2
-10 a -30	-20	13.9	0.01	-2.8
-30	-30	4.4	0.01	-1.3
0	0	509.2	0.01	0.0
	Area balance	671.0	**Total**	**-14.3**
			Promedio anual	**-2.4**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\mathbf{Rv = B + Sh + Dm - \Delta V(S) - Eh - Ri}$$
$$\mathbf{Rv = 37.4 + 7.2 + 5.2 - 2.4 - 21.5 - 2.8}$$
$$\mathbf{Rv = 23.1\ hm^3/año}$$

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

$$\mathbf{R = Rv + Eh + Ri}$$
$$\mathbf{R = 23.1 + 21.5 + 2.8}$$
$$\mathbf{R = 47.4\ hm^3/año}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **47.4 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 que la descarga natural comprometida es de **9.5 hm³ anuales,** que corresponden a la descarga de los manantiales, comprometida como agua superficial para usos doméstico y agrícola, y a las salidas por flujo subterráneo horizontal de las celdas S1 y S2, en las que está incluida parte de la descarga por flujo base del río Tepalcingo.

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 **37,372,624 m^3 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 47.4 – 9.5 – 37.372624
DMA = 0.527376 hm^3/año.

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **527,376 m^3 anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Tepalcingo-Axochiapan y Zacatepec, en el Estado de Morelos, realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980. Estudio geohidrológico de evaluación preliminar de la zona de Tepalcingo-Axochiapan, en el estado de Morelos, realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA).