CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO CUERNAVACA (1701), 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 14
4.3 Geología del subsuelo 15
5. HIDROGEOLOGÍA 16
5.1 Tipo de acuífero 16
5.2 Parámetros hidráulicos 16
5.3 Piezometría 16
5.4 Comportamiento hidráulico 17
5.4.1 Profundidad al nivel estático 17
5.4.2 Elevación del nivel estático 18
5.4.3 Evolución del nivel estático 19
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) 21
7.1.3. Recarga inducida (Ri) 23
7.2 Salidas 23
7.2.1 Extracción por bombeo (B) 23
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 23
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm) 24
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 24
8. DISPONIBILIDAD 25
8.1 Recarga total media anual (R) 25
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 25
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 26
9. BIBLIOGRAFÍA 28

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas. Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Cuernavaca, definido con la clave 1701 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del estado de Morelos, entre los paralelos 18° 40' y 19° 0' de latitud norte y entre los meridianos 99° 20' y 99° 10' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 820 km². Limita al norte con el acuífero Zona Metropolitana de la Cd de México, que pertenece al Distrito Federal; al noroeste con el acuífero Valle de Toluca, al oeste con Tenancingo, ambos pertenecientes al estado de México; al este con Cuautla-Yautepec y al sur con Zacatepec, que pertenecen al estado de Morelos (figura 1).

Geopolíticamente el área que comprende el acuífero cubre totalmente los municipios Cuernavaca, Huitzilac y Jiutepec; casi la totalidad de Emiliano Zapata y Temixco; parcialmente los municipios Miacatlán, Xochitepec y Tepoztlán, todos ellos pertenecientes al Estado de Morelos.

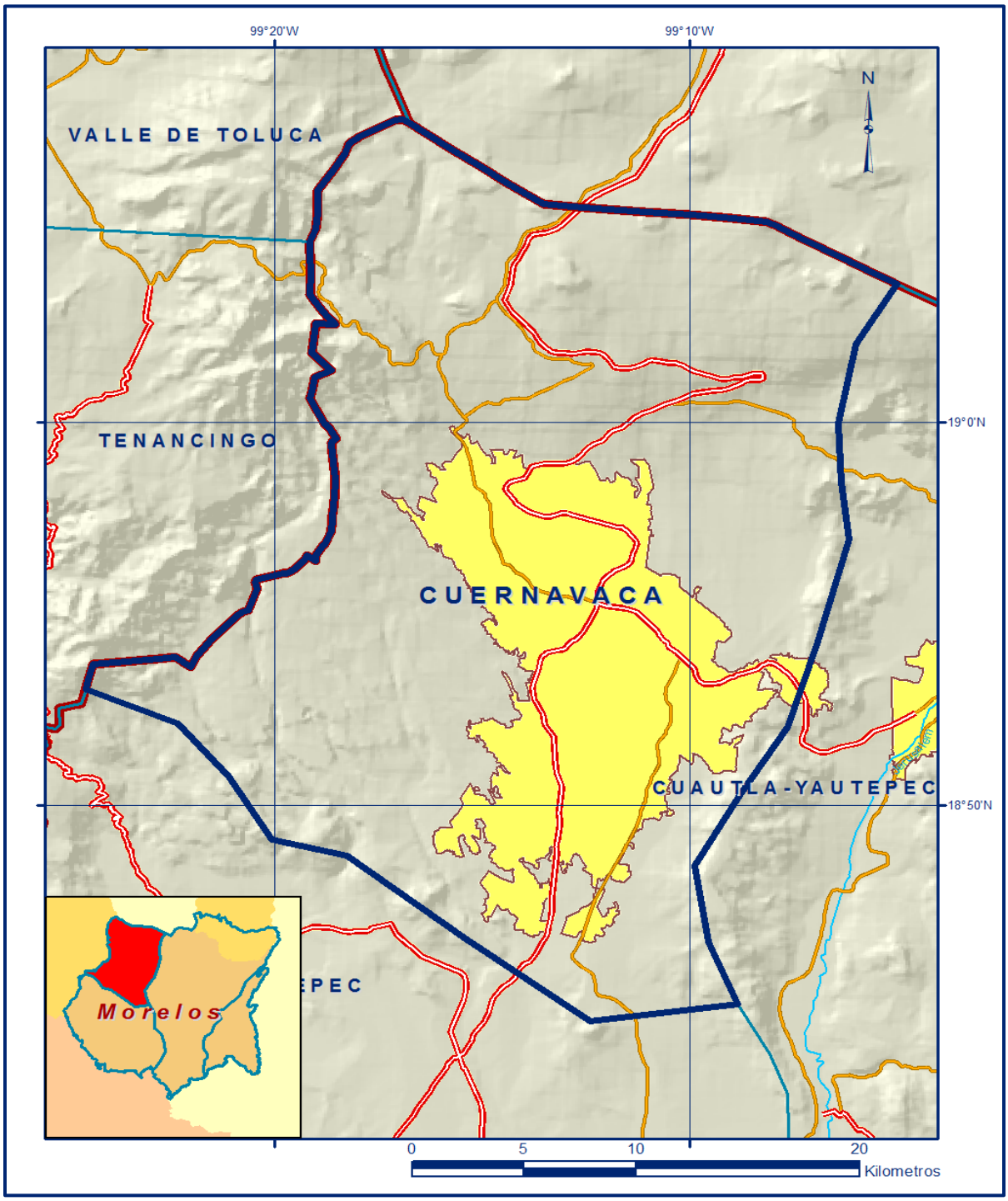


Figura 1. Localización del acuífero

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 1701 CUERNAVACA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	24	32.6	18	53	1.2	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	19	8.5	19	4	44.6	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	99	16	44.9	19	7	50.0	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	99	5	0.1	19	3	37.7	
5	99	6	0.0	19	2	2.7	
6	99	6	25.9	18	59	58.4	
7	99	6	20.8	18	58	25.1	
8	99	6	10.4	18	56	57.1	
9	99	6	57.0	18	54	11.3	
10	99	7	38.5	18	52	1.8	
11	99	8	45.8	18	50	18.2	
12	99	9	53.2	18	48	24.2	
13	99	9	32.4	18	46	25.1	
14	99	8	51.0	18	44	46.6	
15	99	12	23.4	18	44	20.7	
16	99	15	24.7	18	46	30.2	
17	99	18	15.7	18	48	39.7	
18	99	20	4.4	18	49	5.6	
19	99	21	6.6	18	50	44.1	
20	99	22	19.1	18	52	7.0	
1	99	24	32.6	18	53	1.2	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cuernavaca pertenece al Organismo de Cuenca Balsas. Su territorio completo se encuentra vedado, sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda. El primero rige en la porción norte y suroeste y es el *"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 06 de julio de 1973. Esta veda es de tipo II., en la capacidad de los mantos acuíferos solo permite extracciones para uso doméstico.

El segundo está vigente en la porción sureste y es el *"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 DOF el 23 de junio de 1960. Esta veda es de tipo II, en la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para uso doméstico.

El tercer decreto veda la porción central del acuífero y es el *"Decreto que amplía la zona de veda para alumbramientos de aguas del subsuelo, establecida en la zona del Estado de Morelos, según decreto de 1° de junio de 1960"* publicado en el DOF el 26 de marzo de 1962.

Esta veda es de tipo III, en la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal es el público urbano. En su territorio se encuentra establecido el Distrito de Riego No. 16 "Estado de Morelos". No se ha constituido hasta la fecha 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 CUERNAVACA EN EL ESTADO DE MORELOS", realizado en 1981 por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA) parta 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, recomendar las áreas más favorables para la perforación de pozos exploratorios y de explotación, identificar la fuente de recarga de los diferentes acuíferos, así como datar y determinar el origen del agua subterránea.

Para ello se realizaron actividades de campo como piezometría, nivelación de brocales, ejecución pruebas de bombeo, censo de aprovechamientos, toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos, sondeos geofísicos y estudios isotópicos.

Concluye que el agua es de buena calidad, su edad fluctúa entre los 20 a 25 años, que la recarga principal es por infiltración del agua de lluvia y su principal descarga es por bombeo y la descarga a través de manantiales.

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 con la clasificación fisiográfica del INEGI, el área que cubre el acuífero Cuernavaca comprende dos provincias y subprovincias fisiográficas: la porción norte se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac; y su porción sur se encuentra en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses.

Está situado en una zona de traslape de dos grandes provincias fisiográficas que le confieren fuertes contrastes topográficos y un ambiente tectónico complejo: el contacto entre la Sierra Madre Sur y el Eje Neovolcánico.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por presentar 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.

Ente 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 Sierra Madre del Sur, localizada al sur de México, presenta una estructura compleja y se encuentra constituida por una serie de montañas que se extienden a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca, cubriendo una superficie aproximada de 258,274 km2. Limita al norte con la Faja Volcánica Transmexicana (Eje Neovolcánico); al sur, con el Océano Pacífico y al oriente, con las provincias de Sierras y Valles del Sureste y la parte sur de la Planicie Costera del Golfo (Velázquez y Ordaz, 1992). Su parte más alta es muy angosta y forma el espinazo montañoso marginal hacia la costa.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en la porción centro-sur del acuífero predomina el clima (A)C(w1) y (A)C(w2) semicálido subhúmedo del grupo C, con temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frio menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C.

En la región norte se presentan los climas: C(w2) templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18°C y temperatura media del mes más cálido de 22 °C, y Cb'(w2) semifrío, subhúmedo con verano fresco y prolongado, con temperatura media anual entre 5 y 12 °C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18 °C, temperatura de mes más cálido menos de 22°C. Una pequeña porción en la parte sur del acuífero presenta el clima Awo cálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frio mayor de 18 °C.

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 **1278 mm y 19.4°C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evapotranspiración, se obtuvo un valor de **874.7 mm anuales**.

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 “Medio Balsas”, cuenca del Río Amacuzac. En la cuenca del río Amacuzac se encuentran las subcuencas hidrográficas de los ríos Apatlaco y Tembembe. El río Apatlaco tiene una dirección general de noroeste a suroeste, nace en las inmediaciones de la ciudad de Cuernavaca, en las estribaciones de la Sierra Chichinautzin.

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.

Sobre el cauce del rio Apatlaco existen 4 presas derivadoras que abastecen a 921 hectáreas de superficie agrícola pertenecientes al Módulo de Riego “Alto Apatlaco”, también existe el módulo de riego “Las Fuentes” la cual cuenta con una superficie agrícola de riego igual a 4,265 hectáreas regadas principalmente por el agua descargada por 6 manantiales. En ambos módulos se cuenta con una amplia red de canales, con diversos sistemas de distribución y aplicación.

Los tipos de drenaje varían de paralelos a dendríticos; en la porción norte no se define un patrón de drenaje debido a la alta permeabilidad de las rocas de la Formación Chichinautzin.

3.4 Geomorfología

Las formas de relieve son el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Los límites geomorfológicos de la zona acuífera del valle de Cuernavaca son: al norte las sierras de Zempoala, Ajusco y Chichinautzin, al sur la Sierra de Xochicalco, al poniente la prolongación de la Sierra de Zempoala y al oriente la Sierra de Tepoztlán-Tlaltizapán o anticlinal de Ticumán.

Las sierras Zempoala (3,650 msnm) y Chichinautzin (3,690 msnm) son las mayores altitudes y las principales zonas de recarga del acuífero Cuernavaca. La Sierra del Chichinautzin está constituida por coladas de lava de naturaleza basáltica que tiene alta permeabilidad secundaria producto del fracturamiento, permitiendo la infiltración de la lluvia.

La Sierra de Zempoala está conformada por volcanes y coladas de lava de naturaleza andesítica, se ubica en los alrededores de las lagunas de Zempoala.

El desnivel de las sierras y el valle es de 2,490 m en una distancia aproximada de 30 km, lo que da lugar a una expresión geomorfológica de gran contraste. Las sierras descienden abruptamente hacia el sur dando lugar a la formación de lomeríos ondulantes de depósitos aluviales del valle de Cuernavaca (1,500 msnm), con pendientes con dirección S, SE y SW.

El anticlinal de Ticumán es un plegamiento con dirección norte-sur que divide al estado en dos zonas: poniente y oriente.

En la zona poniente del estado se localizan los valles de Cuernavaca y Zacatepec y en la zona oriente se localizan los valles de Yautepec, Cuautla y Tepalcingo-Axochiapan. Este plegamiento está formado por rocas calizas, dolomías, areniscas y lutitas calcáreas.

La Sierra de Xochicalco forma la frontera entre el valle de Cuernavaca y el valle de Zacatepec, es un plegamiento de rocas calizas que funciona como barrera al flujo subterráneo que fluye hacia el acuífero Zacatepec, con el cual se comunica a través de los subálveos de los ríos Tembembe, Apatlaco y Dulce.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial del acuífero de Cuernavaca está representada por unidades litológicas principalmente de origen sedimentario y volcánico, producto de una sucesión de acontecimientos naturales que modelaron la corteza terrestre.

La geología general está representada por rocas sedimentarias (marinas y continentales) así como rocas ígneas intrusivas y extrusivas (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. La edad de esta secuencia es cretácica, aunque podría ser jurásica superior; está cubierta transicionalmente por conglomerados, brechas volcánicas, grauvacas y pelitas tobáceas.

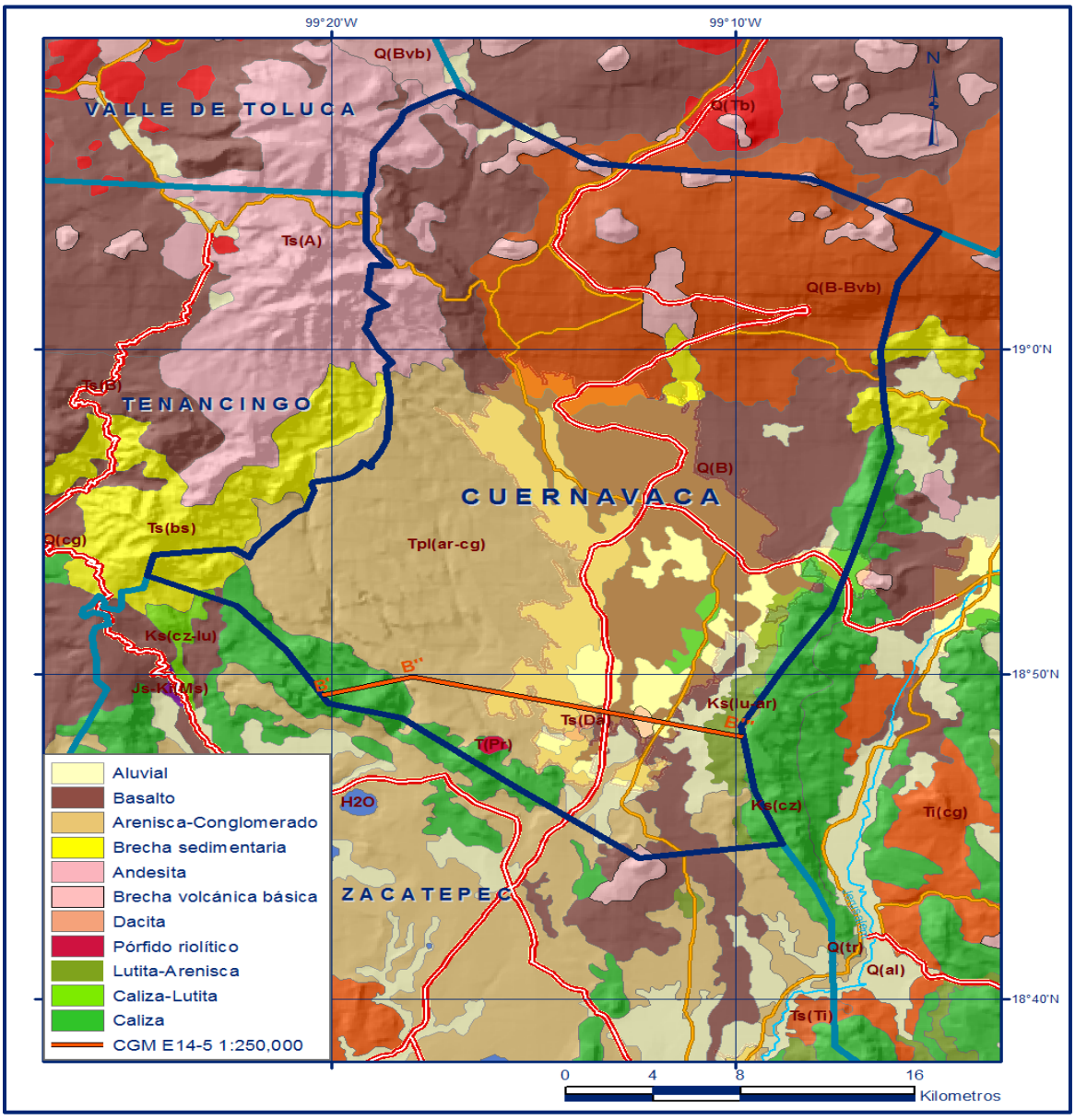


Figura 2. Geología general del acuífero

El acuífero Cuautla-Yautepec se encuentra posicionado en el terreno Mixteco el cual 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 que varían del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se describen las diferentes unidades, de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO

Formación Xochicalco

Es la unidad más antigua y forma parte de la secuencia de rocas sedimentarias marinas de la cual constituye su basamento hidrogeológico. Toma su nombre de la zona arqueológica de Xochicalco, donde se encuentra su localidad tipo. Está formada por calizas que presenta estratos de espesor variable, varía de color gris oscuro a negro; en la s cima contiene abundantes bandas y nódulos de pedernal que disminuyen hacia la base, donde los estratos son más potentes. Su espesor es de aproximadamente de 500 m; su edad corresponde al Aptiano y se encuentra subyaciendo a la Formación Morelos.

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.

En la superficie del acuífero está constituida por calizas y dolomitas de color gris claro y crema, dispuestas en capas de hasta 3 m de espesor.

Presenta fósiles y en algunas zonas abundantes nódulos de pedernal de color gris y rojizo, con fracturas y huellas de disolución. Aflora al suroeste y sureste, constituyendo las sierras que representan el límite con los acuíferos Cuautla-Yautepec y Zacatepec.

Formación Cuautla

El nombre de la Formación Cuautla fue propuesto por Carl Fries (1960) para referirse a las calizas que afloran en las proximidades de Cuautla en el Estado de Morelos.

Esta formación 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. Su espesor alcanza 750 m.

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. Su edad asignada por Fries es del Cenomaniano-Turoniano.

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. Aflora al sureste del área de estudio en contacto concordante con la Formación Cuautla, forma lomeríos redondeados que forman el parteaguas suroriental; es la formación más joven de la secuencia de rocas sedimentarias marinas del Cretácico.

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. Sus afloramientos se extienden en el estado de Morelos y otros estados vecinos como Guerrero, México, Puebla y Oaxaca.

TERCIARIO

Formación Cuernavaca

Aflora ampliamente extendiéndose hacia las inmediaciones del Volcán Popocatépetl, se caracteriza por formar profundas barrancas paralelas, con dirección norte–sur; sobre ella se asienta más de la mitad de la ciudad de Cuernavaca; al oeste, se extiende hasta el Nevado de Toluca y al sur hasta el río Amacuzac.

Está constituida por materiales clásticos que fueron transportados y depositados por corrientes de agua en las partes bajas del valle. Es de granulometría muy variada; desde arenas finas y arcillas hasta conglomerados con bloques de un metro de diámetro; su grado de compactación y cementación varía, desde altamente compactados hasta francamente sin cementación alguna.

Su espesor, según cortes geológicos de pozos perforados en el área de Jiutepec, es de aproximadamente 300 m. Se encuentra descansando discordantemente sobre todas las formaciones más antiguas y a su vez descansan sobre ella los derrames lávicos y productos piroclásticos asociados al Grupo Chichinautzin. La edad de la Formación Cuernavaca es Plioceno Tardío.

Grupo Chichinautzin

Carl Fries en 1965 propone este nombre para identificar a las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados de composición andesítica y basáltica que descansan en discordancia angular sobre la Formación Cuernavaca, señalando su localidad tipo al cerro de Chichinautzin, ubicado en el límite entre el estado de Morelos y Distrito Federal.

Esta unidad estratigráfica comprende a todas las corrientes lávicas y depósitos asociados de composición andesítica y basáltica, incluyendo material detrítico depositado en agua. Sus afloramientos de ubican en el extremo norte, donde está conformada por extensas y potentes corrientes de lava, que se encuentran

interdigitadas con productos piroclásticos, brechas y aglomerados. Litológicamente este grupo se conforma principalmente por basaltos de olivino.

Las unidades litoestratigráficas que están cubiertas parcialmente por los basaltos son las formaciones Cuernavaca y Tepoztlán, el Grupo Balsas y las lutitas y calizas del Cretácico; su espesor alcanza aproximadamente los 1500 m.

Las rocas del Grupo Chichinautzin son correlacionables con las del Volcán Paricutín y su edad corresponde al Pleistoceno-Holoceno.

Depósitos clásticos

Sobreyaciendo a todas las rocas anteriores, se encuentran depósitos clásticos continentales formados por materiales poco consolidados que varían de gravas hasta limos y arcillas. Finalmente, la secuencia estratigráfica se completa con depósitos aluviales cuaternarios del periodo Holoceno, integrados por depósitos sedimentarios clásticos continentales con menor proporción de material volcánicos. Su espesor es reducido y de pequeñas áreas de afloramiento.

Se restringe a las vegas de los ríos y arroyos, donde está constituido principalmente por arenas, gravas y boleos. Resulta difícil en algunas aéreas diferenciarlos de la Formación Cuernavaca.

4.2 Geología estructural

A través del tiempo geológico, el Estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, que han dado lugar a la presencia de una variedad de geoformas. De manera simple se puede clasificar las geoformas en sierras y valles, las primeras 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. La aparición de esta sierra 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. En la porción oriental, la topografía muestra una forma caótica, carente de un sistema de drenaje bien definido; la parte occidental, donde se encuentra el río Apatlaco, es la más accidentada topográficamente, presentándose barrancas pronunciadas labradas por arroyos.

El valle de Cuernavaca presenta sensiblemente una orientación noreste–suroeste, reflejando hacia sus bordes las estructuras de las rocas de edad cretácica que forman los sinclinales.

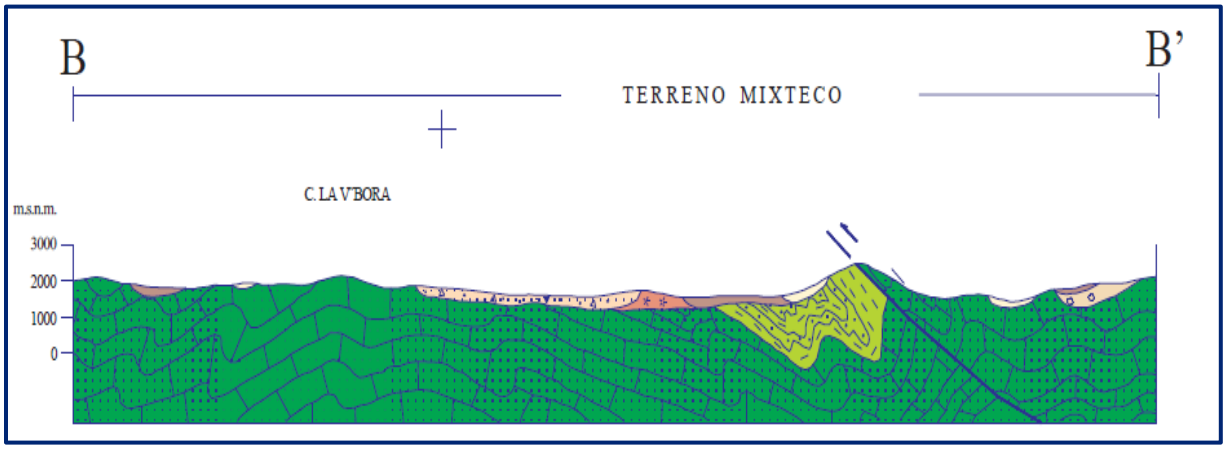
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales que constituyen el lecho y llanura de inundación de los ríos Apatlaco y Tembembe y otros arroyos tributarios, así como por las areniscas y conglomerados con intercalaciones de basaltos y andesitas débilmente empacados en arenas y arcillas, que rellenan los valles, con espesores de hasta 250 m.

Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, constituida principalmente por as calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución y 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 geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por las rocas arcillosas de la Formación Mexcala (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-5 “Cuernavaca” Esc 1:250 000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales que constituyen el lecho y llanura de inundación de los ríos Apatlaco y Tembembe y otros arroyos tributarios, así como las areniscas, conglomerados, basaltos y andesitas.

La porción inferior se aloja en una secuencia de calizas marinas de las formaciones Morelos y Cuautla que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por las rocas arcillosas de la Formación Mexcala.

Esta unidad puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a que se encuentra sobreyacida por las 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 2 pruebas de bombeo de larga 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 **3.0×10^{-3} a 3.3×10^{-2} m^2/s** (259 a 2851 m^2/día). Con respecto a la conductividad hidráulica, los valores oscilan entre **4.4×10^{-5} m/s** a **2.8×10^{-4} m/s** (3.8 a 24.2 m/d).

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 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 los valores varían de 20 a 100 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle. Los niveles estáticos someros se ubican en las localidades Real del Puente, Tezoyuca y Mérida; en tanto que los más profundos se registran en las localidades de Tetlama, Pueblo Viejo y Ahuatepec (figura 4).

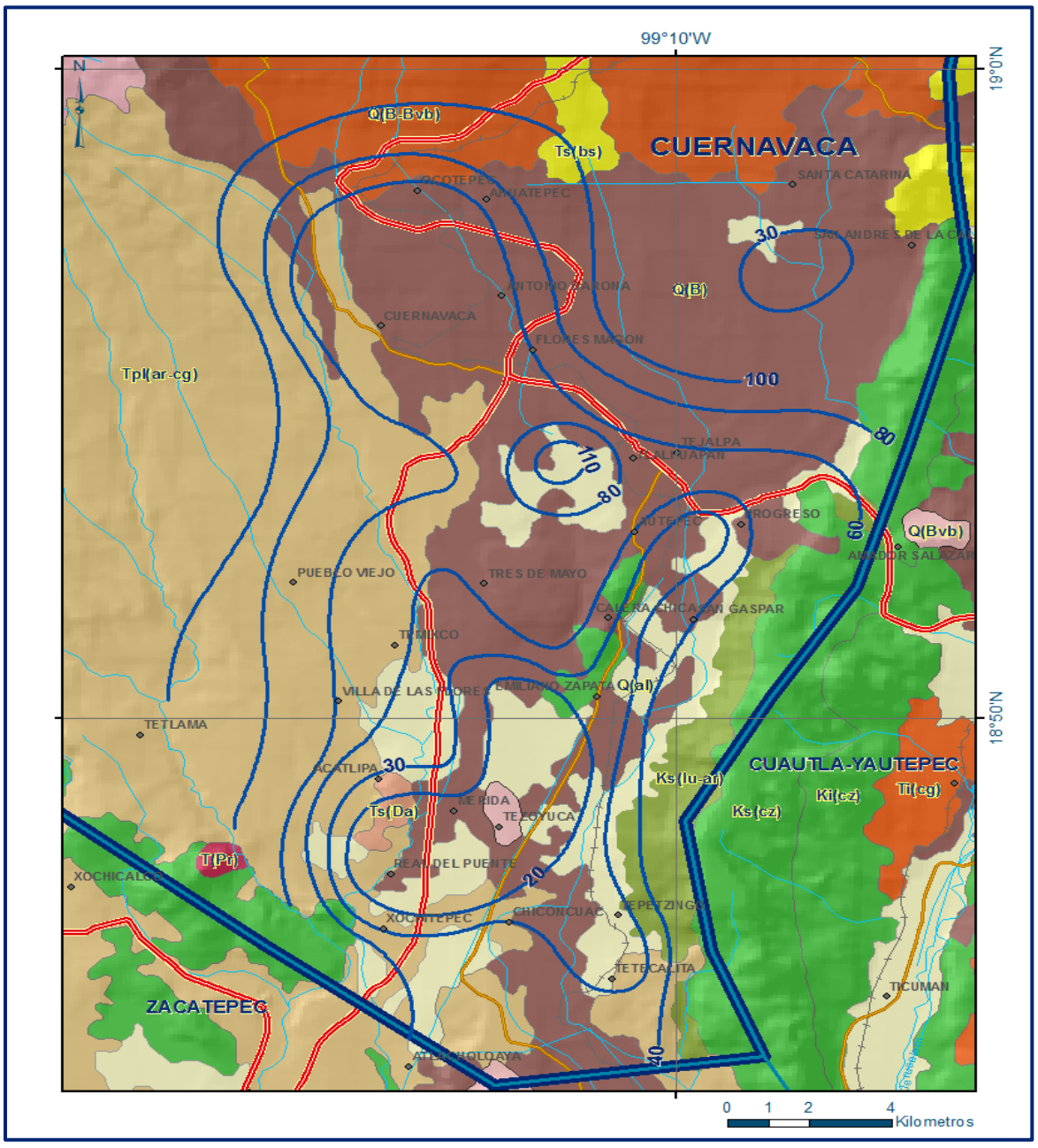


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 presenta valores que varían de 1050 a 1750 msnm. Las menores elevaciones se registran en el límite con el acuífero Zacatepec, hacia la localidad de Xochitepec, aumentando gradualmente conforme se asciende topográficamente hasta las mayores elevaciones, hacia la localidad de Ocotepec, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur (figura 5).

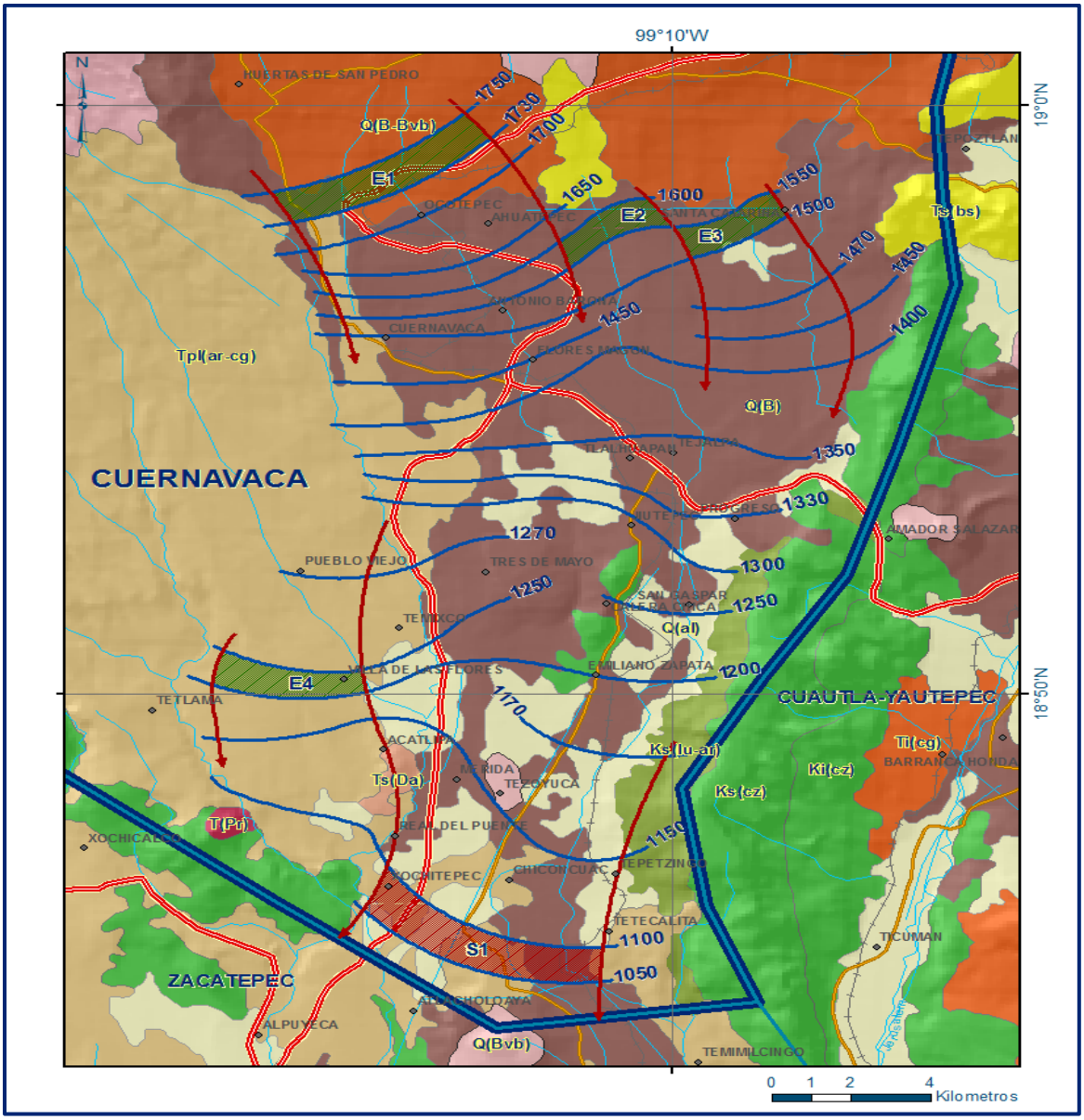


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se logró una correlación puntual de los pozos en los que existe información piezométrica histórica que permita la configuración de evolución. 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.

Además, 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 considera 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 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 2010, se tomaron 20 muestras de agua de los pozos piloto, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, 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 modificación a 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 100 y 610 ppm. Las concentraciones más bajas se ubican en la porción central del acuífero, en las inmediaciones de Cuernavaca y Jiutepec, incrementándose hacia el sur, confirmado de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las mayores concentraciones se localizan de manera puntual en Xochitepec y Cuernavaca.

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 443 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 355 son pozos, 48 norias y 40 manantiales. Del total de obras, 433 se encuentran activas y 10 inactivas; de las obras activas 52 son para uso agrícola, 301 para uso público-urbano, 50 para actividades domésticas y 40 para uso industrial.
El volumen de extracción asciende a **219.1 hm^3 anuales**, de los cuales 7.0 hm^3 año (3.2 %) se destinan al uso agrícola, 192.0 hm^3 año (87.6 %) al uso público urbano, 0.2 hm^3 año (0.1 %) al uso doméstico, 6.5 hm^3 año (3.0 %) al uso de servicios, 10.1 hm^3 año (4.6 %) al uso industrial y 3.3 hm^3 año (1.5 %) a usos múltiples.

Adicionalmente, a través de **manantiales** se descarga un volumen estimado de **103.0 hm^3 anuales**, destinados al uso agrícola, en su mayor parte en el acuífero vecino al sur Zacatepec, por lo que no se considera para la recarga inducida en el acuifero Cuernavaca.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para 2010, en una superficie de 450 km2, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual 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 y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv) y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del 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 cuenta con 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:

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

Donde:
Rv= Recarga vertical;
Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal;
Ri= Recarga inducida;
B= Bombeo;
Dm= Descarga de manantiales;
Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;
ΔV(S)= Cambio de almacenamiento.

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

$$\mathbf{Rv = B + Dm + Sh – Eh – Ri \pm \Delta V(S)} \qquad \mathbf{(2)}$$

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, mostrada en la figura 5. 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:

$$Q = B * i * T$$

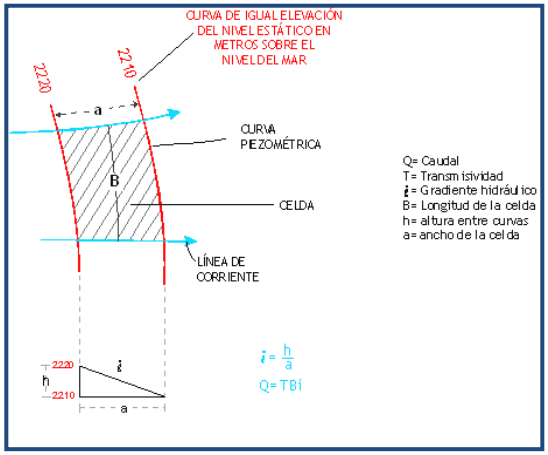
Donde:

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 uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda**.**

Tabla2.Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (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	5390	1100	20	0.0182	0.010	0.9800	30.9
E2	2480	1100	50	0.0455	0.008	0.9018	28.4
E3	3860	965	50	0.0518	0.008	1.6000	50.5
E4	3860	965	50	0.0518	0.006	1.2000	37.8
						Total entradas	**147.6**

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **147.6 hm^3/año**.

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 22.1% (OCB, 2012).

El volumen total de agua destinada a la agricultura es de 7.0 hm^3 anuales. Si consideramos que el 22.1 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna como recarga efectiva al acuífero, su valor es de 1.5 hm^3/año.

Por otra parte, al aplicar el 22.1% al volumen de agua para uso público-urbano de 192.0 hm^3/ año, arroja un valor de infiltración de 42.4 hm^3/año. Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida asciende a 43.9 hm^3/año. **Ri = 43.9 hm^3/año.**

7.2 Salidas

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

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **219.1 hm^3 anuales**.

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 5, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas 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	5790	1655	50	0.0302	0.004	0.6997	22.1
					Total salidas		**22.1**

El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **22.1 hm³/año.**

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

De la revisión de los títulos de concesión de agua procedente de la descarga de manantiales, algunos de ellos compartidos con el acuífero Cuautla-Yautepec, y de los volúmenes medidos de entrega como agua superficial a las Asociaciones Civiles de Usuarios Agrícolas, se estima que su volumen es de **103.0 hm³/año.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

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 recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, 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 esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **ΔV(S) = 0.**

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:

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

$$Rv = 219.1 + 103.0 + 22.1 - 147.6 - 43.9 + 0.0$$

$$Rv = 152.7\ hm^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = Rv + Eh + Ri$$
$$R = 152.7 + 147.6 + 43.9$$
$$R = 344.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **344.2 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 **125.1 hm³ anuales,** que corresponden a la descarga de los manantiales, a la salida por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero vecino Zacatepec, en la que está incluida parte de la descarga por flujo base del río Apatlaco.

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 **199,861,486 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

DMA = R – DNC – VEAS

DMA = 344.2 – 125.1 – 199.861486

DMA = 19.238514 hm³/año.

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **19,238,514 m³ 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, 1981. Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Cuernavaca, en el estado de Morelos. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA).