



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO AJACUBA (1311), ESTADO DE
HIDALGO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia Fisiográfica	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrología superficial	7
3.4	Geomorfología.....	7
4	GEOLOGÍA.....	8
4.1	Estratigrafía.....	9
4.2	Geología estructural.....	19
4.3	Geología del subsuelo	21
5	HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1	Tipo de acuífero	21
5.2	Parámetros hidráulicos.....	22
5.3	Piezometría	22
5.4	Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3	Evolución del nivel estático	24
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	27
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
7.1	Entradas	28
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	28
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	29
7.1.3	Recarga inducida (Ri)	30
7.2	Salidas.....	31
7.2.1	Bombeo (B).....	31
7.2.2	Evapotranspiración (ETR).....	31
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	33
7.2.4	Descarga a través de manantiales (Dm)	33
7.2.5	Descarga a través de canales y drenes (Dc).....	33
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	33
8	DISPONIBILIDAD	35
8.1	Recarga total media anual (R).....	35
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	35
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	36
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	36

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

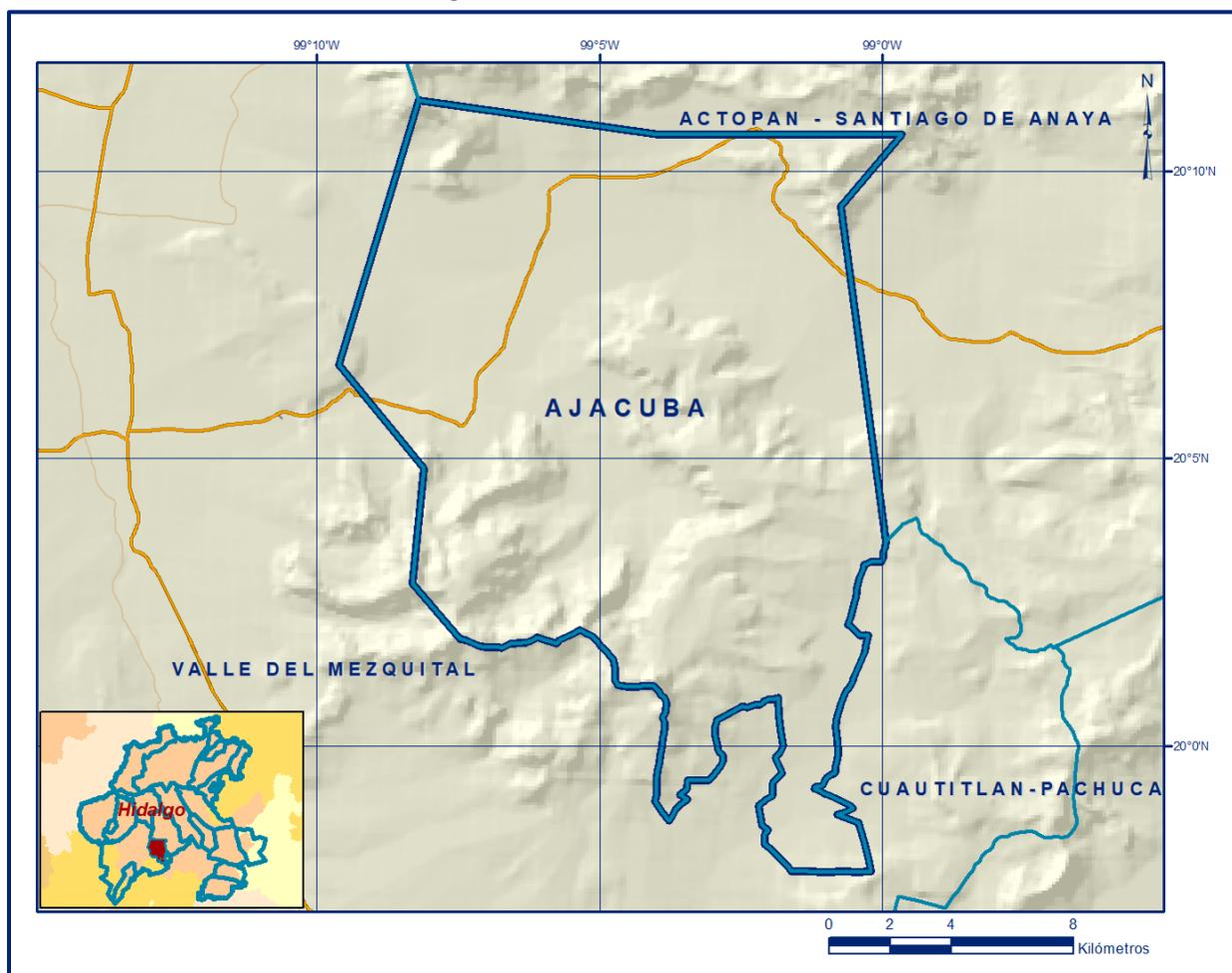
Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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 Ajacuba definido con la clave 1311 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al sur del estado de Hidalgo, entre los paralelos 19°58' y 20°11' de latitud norte y los meridianos 99°00' y 99°10' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 271 km² (Figura 1).

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 de la poligonal simplificada del acuífero

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	7	27.3	20	1	52.1	
2	99	8	18.5	20	2	49.7	
3	99	8	5.9	20	4	50.6	
4	99	9	36.6	20	6	38.8	
5	99	8	12.1	20	11	15.3	
6	99	3	57	20	10	39.6	
7	98	59	38.5	20	10	39.3	
8	99	0	43.8	20	9	23.6	
9	98	59	55.1	20	3	32.9	DEL 9 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	7	27.3	20	1	52.1	

Limita al norte y este con el acuífero Actopan-Santiago de Anaya, al sur y oeste con el acuífero Valle del Mezquital, pertenecientes al Estado de Hidalgo. Geopolíticamente abarca prácticamente en su totalidad el municipio Ajacuba y parcialmente los municipios San Agustín Tlaxiaca, Tetepango, así como pequeñas porciones del municipio Francisco I. Madero.

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Ajacuba pertenece al Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Hidalgo. En el territorio completo que cubre el acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El principal usuario es el público-urbano. En el territorio del acuífero no existen Distritos ni unidades de riego y actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona del acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos.

A continuación, se mencionan los estudios más recientes e importantes:

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO EN ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: VILLA VICTORIA-ZACAZONAPAN Y TEMASCALTEPEC, ESTADO DE MÉXICO; VALLE DE CADEREYTA Y SAN JUAN DEL RÍO, QRO.; AJACUBA Y ZIMAPÁN, HGO., elaborado por Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S. C, para la Comisión Nacional del Agua en 2004. El estudio consideró los siguientes objetivos: Establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica del acuífero, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo; conocer la evolución y la condición actual de los niveles del agua subterránea así como las tendencias inducidas por causas naturales o antropogénicas, mediante recorridos piezométricos; establecer un marco de referencia actualizado para identificar los cambios que generen los desarrollos futuros sobre las fuentes el agua subterránea.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. para la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo en 2007. En este estudio se realizó un censo de aprovechamientos; pruebas de bombeo con las que se obtuvieron parámetros hidráulicos; se identificó el comportamiento piezométrico para un periodo de siete años y se elaboró un balance de aguas subterráneas.

Se describe el funcionamiento del sistema acuífero, identificando un sistema somero y uno profundo, así como la relación entre ellos. Se realizaron 76 análisis físico-químicos a muestras de agua subterránea provenientes de pozos, para determinar las condiciones de calidad.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA-FINANCIERA Y SOCIAL DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN-CAPTACIÓN-CONDUCCIÓN Y ENTREGA DEL AGUA DEL ACUEDUCTO VALLE DEL MEZQUITAL-ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO. Elaborado por FG y Asociados para el Sistema de Aguas de la Ciudad de México en 2009. El objetivo de este estudio fue determinar la viabilidad técnica, económica, financiera, social y ambiental de un sistema de aprovechamiento integral de los acuíferos localizados en el Valle del Mezquital, como una fuente para el abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para desarrollar el anteproyecto que permita cuantificar los costos de agua en bloque y determinar su competitividad con relación a otras fuentes de abastecimiento.

ANÁLISIS TÉCNICO Y PRUEBAS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL, EN DIVERSOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE HIDALGO. Elaborado por Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en 2010. Los objetivos de este trabajo fueron estimar los efectos de la exposición a contaminantes emergentes por uso y consumo de agua ante diferentes escenarios de tratamiento; establecer la distribución más probable de dichos contaminantes en el medio ambiente; determinar a escala piloto la eficiencia y costo del uso de membranas para la eliminación de contaminantes y proponer el diseño funcional más adecuado para el tratamiento del agua del acuífero con fines de uso y consumo humano.

ESTUDIOS TÉCNICOS DE GEOHIDROLOGÍA, CALIDAD DEL AGUA, TENENCIA DE LA TIERRA Y ASPECTOS SOCIALES EN LA ZONA DE CAPTACIÓN PARA EL “SISTEMA MEZQUITAL PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN BLOQUE AL VALLE DE MÉXICO E HIDALGO”. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C. V. para la Comisión Nacional del Agua en 2012-2013. El objetivo del estudio fue conocer el funcionamiento actual del acuífero Valle del Mezquital, incluyendo los valles de Actopan, Ixmiquilpan y Chapantongo y determinar el volumen de agua que podría ser obtenido del subsuelo y conducido hacia la Ciudad de México para apoyar su abastecimiento. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, pruebas de bombeo, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para actualizar la disponibilidad. Define el aprovechamiento potencial y los sitios susceptibles para la ubicación de nuevos aprovechamientos; mediante un modelo numérico de flujo subterráneo simula diferentes escenarios de extracción y establece las afectaciones que se generarían a los usos actuales. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron 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 de Raisz (1964), la zona se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico que en esta región se caracteriza por planicies construccionales escalonadas o valles fluviales, aluviales y lacustres, poco disectados. Hacia el oriente del acuíferos

La superficie del acuífero se encuentra en la Subprovincia Fisiográfica Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (INEGI, 2001), que se diferencia por la edificación de significativos espesores lávicos y piroclásticos característicos del Eje Neovolcánico.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor parte de la superficie del acuífero predomina el clima semiárido, templado (BS₁kw), con régimen de lluvias en verano, que se registra entre los meses de junio y septiembre. La temperatura media anual en la región varía de 14 a 16 °C. La precipitación media anual en la región varía de 1,200 mm en la porción suroeste a 500 en la zona del valle.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero: Presa Endhó, Atotonilco, Tezontepec, Mixquiahuala, Ajacuba y Tepeji. Sin embargo, no todas las estaciones tienen registro continuo para un mismo periodo, por lo que se optó por determinar la temperatura de la información disponible de las estaciones climatológicas y la precipitación a partir del mapa de isoyetas del INEGI, (anuario estadístico del Estado de Hidalgo, 2010). De esta manera, se obtuvieron valores de precipitación y temperatura media anual de **550 mm** y **16.0 °C**, respectivamente.

3.3 Hidrología superficial

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica (RH) 26 Pánuco, Subregión Hidrológica Río Tula, en la cuenca el Río Moctezuma. La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde la porción sureste a través de arroyos intermitentes, de poca importancia, los cuales escurren con dirección general de sur a norte y hacia la planicie, sin reconocer alguna corriente principal dentro del territorio del acuífero.

En el área, la infraestructura hidráulica existente para aprovechar los recursos hídricos superficiales es mínima, existen algunos canales y obras de extracción como algunos pozos y norias. Dentro del área se localiza el Distrito de Riego 003A Ajacuba, con una superficie sembrada de 2,900 ha; abastecido a través del canal del mismo nombre.

3.4 Geomorfología

De acuerdo con el relieve topográfico se distinguen tres unidades geomorfológicas: valles, lomeríos y sierras.

Valles. Son de origen aluvial y corresponden a depósitos de material granular que ocupan grandes extensiones entre Mixquiahuala, Tepatepec y Actopan, así como Ixmiquilpan y entre Chapantongo y Alfajayucan. Su altitud promedio en el valle de Ajacuba es de 2,100 msnm.

Lomeríos. Se localizan al sur del acuífero, en donde presentan formas redondeadas y pendientes suaves a moderadas, algunos de ellos están constituidos por rocas calcáreas; en general están constituidos por materiales tobáceos erosionados.

Sierras. Se localizan al sur y norte del acuífero y están constituidas por rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno, principalmente por basaltos, andesitas y brechas basálticas. Sus elevaciones varían de 2,700 y 2,400 msnm y se levantan entre 300 y 600 m sobre el nivel de los valles.

4 GEOLOGÍA

La geología superficial está representada principalmente por rocas volcánicas de ambiente geotectónico asociado a un arco continental y en menor proporción por rocas sedimentarias del Cretácico y de ambiente geotectónico relacionado al orógeno de la Sierra Madre Oriental (Figura 2).

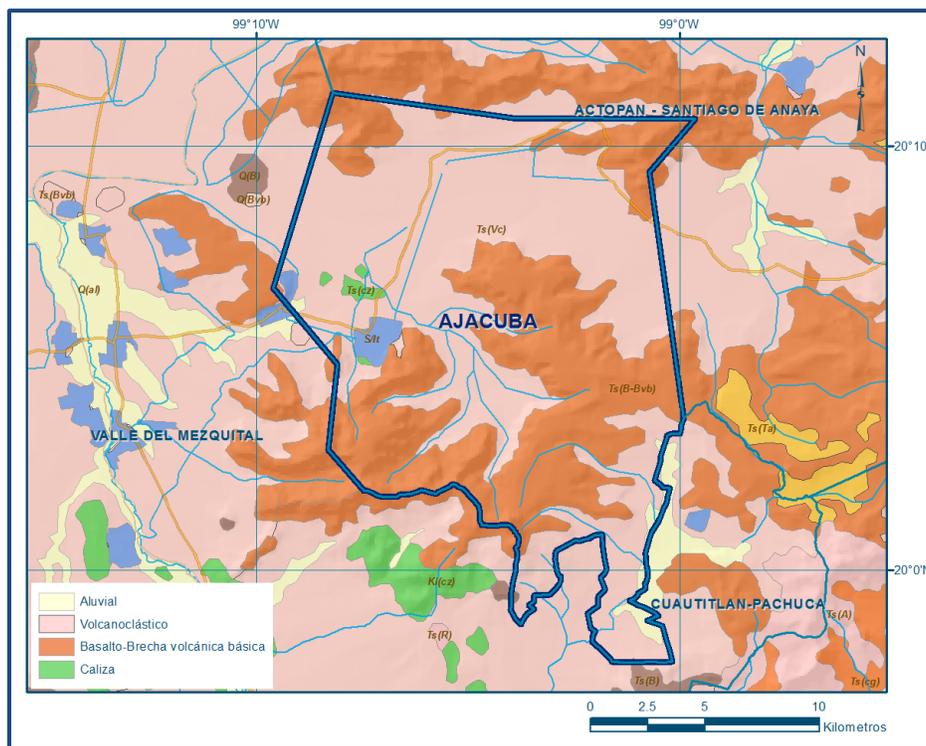


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía de la región incluye rocas sedimentarias y volcánicas cuyo registro comprende del Cretácico Superior al Reciente. A continuación, se describe la secuencia estratigráfica, de la unidad más antigua a la más reciente:

Cretácico Superior

Formación El Doctor

Fue definida formalmente por Wilson *et al.* (1955), para designar a rocas calcáreas de banco de edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano. Posteriormente, en 1962, Fries menciona que la facie de cuenca de esta unidad es la que aflora entre Apaxco y Tula, Hidalgo y que probablemente hacia el sur se interdigite en el subsuelo con la Formación Morelos. Según Fries, corresponde a una secuencia de 200 metros de espesor de calizas de textura fina en capas delgadas, con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones locales de lutita. Corresponde a la unidad más antigua que aflora en la zona de estudio. Está formada por rocas calizas de grano fino (micritas) compactas, dispuestas en estratos de 50 cm de espesor. Presenta color gris a gris claro y abundantes fósiles. Aflora en la sierra ubicada al noreste de Xochitlán (en el norte del Valle del Mezquital) y en los cerros de Bomintzhá y Conejos (en el sur del valle). Constituye el basamento de la región. En la parte central del valle (en la zona del volcán Xicuco), se encuentran sepultadas a 400 y 500 metros de profundidad (Comisión Federal de Electricidad, 1996). Se estima que su espesor máximo alcanza 2000 m.

Formación Soyatal

Esta formación definida por Wilson *et al.* (op. cit), aflora fuera del área de estudio en el noroccidente donde tiene aproximadamente 100 m de espesor total, mientras que hacia el oriente disminuye hasta desaparecer. Las capas de caliza varían de delgadas a medianas y raras veces exceden 30 cm de espesor, es común una laminación fina. Hacia arriba en la sucesión, se presentan capas de lutitas calcáreas. Los fósiles encontrados constan principalmente de bivalvos del género *Inoceramus*, indicando una edad turoniana, por lo que puede correlacionarse con la Formación Agua Nueva (Stephenson, 1921) de la Cuenca de Tampico, o sea la parte inferior del Grupo Xilitla (Bodenlos, 1956). Al suroccidente de la zona, fuera del área del acuífero, aflora una sucesión de capas gruesas de calizas con más de 200 m de espesor total, de facies de banco submarino, con abundantes biostromas repletos de rudistas y gasterópodos, que comprueban una edad turoniana (Fries 1962).

Esta caliza es bastante pura, no tiene intercalaciones de capas dolomíticas, presenta algo de pedernal y fósiles silicificados. Sin embargo, esta sucesión de calizas se correlaciona más con la Formación Cuautla, que aflora al sur de la Cuenca de México (Fries, 1960), que con la Formación Soyatal.

Formación Mexcala

Denominada por Fries (1960) en la cuenca del Río Balsas, en su localidad tipo del poblado Mexcala, Guerrero. En el área de estudio descansa encima de la Formación Soyatal y está formada en su porción inferior por capas alternadas de limolita, lutita, marga y arenisca (grauvacas o subgrauvacas). Hacia la cima las capas de marga y caliza desaparecen y las areniscas predominan, incluso con capas intercaladas de conglomerado de fragmentos finos. Es probable que su espesor máximo en los sinclinales más profundos, se encuentre entre los 600 y 1,000 m. La Formación Mexcala es poco resistente a la erosión y tiende a formar valles drenados por ríos subsecuentes. En el área aflora en el sur y suroeste, en los cerros Blanco y al sur de Bomintzhá, al suroeste del cerro El Elefante, en las inmediaciones del poblado de Mixquiahuala, al norte de Santiago de Anaya y en la porción nororiental.

Fries (*op. cit.*) considera que la parte basal de esta sucesión clástica es de edad coniaciana, mientras que los fósiles colectados por Segerstrom (1961) en la región de Zimapán, al noroeste del área, señalan edades desde el Coniaciano hasta el Campaniano. Su depósito ocurrió en aguas marinas someras y representa una secuencia Flysch (De Cserna, 1988), la cual posiblemente se originó como consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático durante el Cretácico del borde occidental del continente (Damon *et al.*, 1981).

Cenozoico

Grupo el Morro

De acuerdo con Segerstrom (*op cit.*), esta es la primera unidad post-mesozoica en el área; consta de sedimentos continentales que sobreyacen localmente a las rocas cretácicas plegadas y profundamente erosionadas, con gran discordancia angular y erosional. Aflora de manera aislada en pequeñas áreas ubicadas en diferentes localidades: al sur de Tula del Progreso, en las faldas e inmediaciones del cerro Bomintzhá y en los límites del cerro San Miguel de La Cal y cerro El Elefante. Las rocas que lo conforman son muy resistentes a la erosión y tienden a formar acantilados.

La litología del Grupo el Morro es extremadamente variable, pero la composición más típica corresponde a un conglomerado calizo muy compacto y cementado, de color rojo, cuyos componentes se derivaron de la erosión de las rocas cretácicas infrayacentes.

Este conglomerado contiene localmente intercalaciones de arenas y limos de color pardo, así como capas de grano fino de material tobáceo o lítico volcánico. La litología es aún más variable fuera de los límites del área, al norte, incluyen calizas lacustres, yesos, derrames de lava y otros productos volcánicos.

En la región de Zimapán, la unidad fue denominada Fanglomerado el Morro por Simons y Mapes (1957). En el Estado de Morelos y en gran parte de la cuenca hidrográfica del Río Balsas, dicha unidad fue nombrada Grupo Balsas (Fries, 1960). En las cercanías de la ciudad de Guanajuato existe una sucesión muy gruesa de sedimentos correlacionables con el Grupo El Morro.

Estos fueron descritos por Edwards (1955) como “Conglomerado Rojo de Guanajuato” y por los fósiles vertebrados encontrados en ellos, se les asignó una edad correspondiente al Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano (Fries *et al.*, 1955), misma que se asigna al Grupo El Morro en el área de estudio (Fries, 1960).

El Grupo El Morro posiblemente es el resultado de la acumulación rápida de sedimentos de origen terrestre en una cuenca de hundimiento (Simons y Mapes, 1956). Según, De Cserna *et al. (op. cit.)*, este grupo representa una molasa continental post Orogenia Laramide.

El espesor de los restos observables en el área, es de algunas decenas de metros, aunque no sería raro encontrar espesores de varios cientos de metros. Es común encontrar esta unidad en zonas de estructura sinclinal y encima de bloques fallados hacia abajo (Fries, 1960).

Grupo Pachuca

El nombre fue propuesto por Segerstrom (*op. cit.*) para referirse a rocas volcánicas, cuya composición varía de basalto a riolita, que sobreyacen en discordancia erosional al Grupo El Morro y en algunos lugares en discordancia angular; de igual manera descansan en discordancia angular sobre rocas cretácicas.

La sucesión más gruesa y más completa de estas rocas se define en la Sierra de Pachuca, en donde están muy falladas, intrusionadas, alteradas hidrotermalmente y mineralizadas, que subyacen a corrientes de riolita. Pertenecen también a este grupo las rocas volcánicas que afloran en la Sierra de Actopan, Sierra de Xinthé y en el cerro El Picacho, ubicado al norte de Santa María Ajoloapan, por su similitud con las rocas de la Sierra de Pachuca.

El SGM (1999) se refiere como Grupo Pachuca las rocas volcánicas que afloran en las sierras La Joya o Cerro Grande, localizadas al poniente de la zona de estudio.

Por su parte Fries (1962), define Rocas Volcánicas no Diferenciadas a todas las volcánicas con posición estratigráfica parecida, excluyendo las del Grupo Pachuca, con excepción de las volcánicas de las Sierras de Pachuca y Actopan, por no haberse estudiado con suficiente detalle para poder correlacionarlas con diversas formaciones que componen dicho grupo.

Entre estas rocas se encuentran las que conforman la Sierra Xinthé y Cerros de Mexe, Chinfi y El Picacho, entre otros. El mismo autor, piensa que estas rocas tuvieron sus propios centros eruptivos de emisión, ubicados en las cercanías o aún debajo de los afloramientos actuales. Las fuentes magmáticas de todas estas rocas probablemente estuvieron comunicadas a profundidad o tuvieron un mismo origen.

El Grupo Pachuca fue dividido en ocho formaciones (Tezuantla, Cerezo, Vizcaína, Santa Gertrudis, Real del Monte, Pachuca, Corteza y Santiago) basado en estudios detallados realizados de la geología del distrito minero Pachuca-Real del Monte (Geyne, *et al.*, 1963), en donde predomina la andesita y la sucesión tiene más de 2,500 m de espesor. Todas las formaciones mencionadas están constituidas por capas o estratos interdigitados, compuestos por derrames de lava, brecha volcánica y toba. Tiene algunas capas clásticas interestratificadas (conglomerado volcánico y arenisca tobácea) y localmente depósitos lacustres (calizas, lutitas y margas). Las discordancias erosionales dentro del grupo, son de tal magnitud que una de las formaciones más recientes puede descansar directamente sobre una de las más antiguas. En la Sierra de Actopan está representada por aproximadamente 500 m de basalto, andesita y riolita y en la Sierra Xinté afloran de 600 a 700 m de andesitas. En el Cerro El Picacho, la sucesión volcánica es delgada, inferior a 150 m de espesor.

La edad del Grupo Pachuca queda limitada por la del Grupo El Morro, infrayacente y la de la Formación Zumate, suprayacente; es decir, debe ser más reciente que el Oligoceno Temprano y más antigua que el Plioceno Temprano.

Este grupo marca el inicio de una fuerte actividad volcánica a principios del Cenozoico, que obstruyó el drenaje fluvial de ríos antiguos y, en consecuencia, se formaron incipientes cuencas endorréicas lacustres. Por su amplio rango de edad, incluyen rocas volcánicas relacionadas genéticamente con la actividad terminal del arco magmático de la Sierra Madre Occidental e inicio de la actividad del arco continental de la Franja Volcánica Transmexicana (Vázquez y Jaimes, 1989).

Las secciones geológicas disponibles, muestran que el Grupo Pachuca, por el efecto de fallas normales que lo desplazan (al igual que la Formación El Doctor), se profundiza desde el flanco de los valles del área hacia el centro de los mismos, constituyendo la roca basal de algunos de estos valles en donde comúnmente está cubierto por materiales de relleno de la Formación Tarango y Grupo San Juan.

En el valle de Actopan, se presenta aproximadamente a 400 m de profundidad y en la parte noreste del valle del Mezquital yace aproximadamente entre 330 y 660 m de profundidad. En el valle de Ajacuba, se encuentra a 520 m de profundidad y en el valle de Tepatepec a más de 600 m de profundidad aproximadamente. Por la misma distribución en el subsuelo del Grupo Pachuca, ha sido penetrado por algunas perforaciones de pozos de abastecimiento de agua de menos de 200 m de profundidad, sobre el flanco de los valles mencionados y sobre los flancos del Cerro Grande, ubicado al sur de la Sierra Xinthé.

Toba Don Guinyó

Fue definida por Segerstrom (*op. cit.*) para referirse a tobas, brechas volcánicas e ignimbritas compactas con lentes horizontales de obsidiana; de composición dacítica a riolítica, que parecen haberse acumulado sobre una superficie muy erosionada. Afloran en las inmediaciones de Tula (Cerro Xicuco, Arroyo El Corazón, Río Jilotepec). De acuerdo con el SGM (*op. cit.*), también afloran en el flanco norte y sur de la Caldera de Huichapan, localizada al poniente, fuera del área de estudio. Estas ignimbritas tienen aproximadamente 170 m de espesor en el Cerro Xicuco. El Cerro Xicuco es evidencia de un manto más extenso, ahora erosionado, que tiene su desarrollo hacia el poniente, posiblemente asociado con la Caldera de Huichapan.

Por la posición topográfica y la erosión profunda, su edad corresponde al Plioceno Medio (Fries, 1962). La CFE (*op cit*) identificó la Toba Don Guinyó en extensión y acuñamiento hacia el sur del Cerro Xicuco, a 400 m de profundidad máxima, sobreyacida por arcillas de los depósitos lacustres del Plioceno Medio.

Formación Zumate

En las partes más elevadas de las Sierras de Actopan y Pachuca, se presenta una sucesión de rocas andesíticas y dacíticas, formada por la interestratificación de derrames de lava, capas de brecha y depósitos de lahar, que se han denominado Formación Zumate (Geyne *et al.*, *op cit*). Sobreyace con marcada discordancia erosional al Grupo Pachuca. Esta formación está inalterada, poco fallada y sin mineralización de cuarzo, pero intrusionada por algunos diques; se caracteriza por la textura porfídica de sus lavas excepcionalmente gruesas y por sus formas erosionales de pináculos (Segerstrom, *op. cit.*).

Parece que la fuente de eyección de estas rocas, estuvo localizada dentro del área actual de afloramiento y, aunque la sucesión está bastante erosionada, aún permanece un espesor máximo de 360 m. Su acumulación ocurrió después de la mineralización en el distrito minero de Pachuca, por lo que su edad se supone corresponde al Plioceno Medio (Fries, 1962). El SGM (*op. cit.*) correlaciona con la Formación Zumate a las rocas volcánicas que afloran en las sierras ubicadas al poniente de la población Tepeji del Río (Sierras El Templo, Canoas, Las Ánimas y Coamango) y en el Cerro Grande al noroeste de Chapantongo.

Formación Taximay

Depósitos lacustres que consisten principalmente de arcillas de consolidación avanzada que no afloran en el área que cubre el acuífero. La edad de estos depósitos se asigna al Plioceno Medio debido a que descansan sobre la Toba Don Guinyó infrayacente y es cubierta por la Formación Tarango, con una marcada discordancia erosional.

Estas arcillas fueron reconocidas por Mooser (2010) como Formación Taximay, en el subsuelo entre Huehuetoca y Tula de Allende. Presentan un espesor mayor de 50 m y se identifica en las partes topográficamente más bajas y a 130 m en la zona del parteaguas hidrográfico entre el valle del Mezquital y valle de Zumpango, localizado al sur.

En el Valle del Mezquital, se ha identificado la presencia de estas arcillas a profundidad, también cubiertas por la Formación Tarango en discordancia angular. La sección geológica que atraviesa el valle, entre los cerros Bomintzhá y El Elefante, muestra que las mismas arcillas se profundizan debido a las fallas normales que las desplazan, desde el flanco sur del valle, en donde ocurren aproximadamente a 50 m de profundidad, hacia el norte del valle en la zona de Mixquiahuala, donde se encuentran aproximadamente a 260 m de profundidad. La misma sección geológica muestra la presencia de capas intercaladas de gravas y arenas en el flanco sur del valle, que se interpretan como abanicos aluviales de frente montañoso antiguo. Se estima que su espesor es mayor de 160 m.

La CFE (*op cit.*) dividió la Formación Tarango en dos miembros con base en secciones geológicas-geofísicas realizadas en la zona del Cerro Xicuco. El miembro inferior lo define como tobas lacustres arcillo-arenosas de 200 m de espesor promedio, cuyas resistividades no sobrepasan 15 ohms/m. El miembro superior, se refiere a tobas areno-arcillosas de 220 m de espesor que sobreyacen en discordancia erosional al miembro inferior. Las tobas lacustres se correlacionan con la unidad de los depósitos lacustres del Plioceno Medio, ya que guardan la misma posición estratigráfica que las arcillas lacustres reconocidas en el subsuelo en las otras zonas descritas del valle del Mezquital. Estas arcillas lacustres no han sido reconocidas en el subsuelo de los otros valles del área de estudio (valles de Ajacuba, Tepatepec y Actopan), cuyo relleno granular se ha identificado formado sólo por la Formación Tarango.

Basaltos Grupo San Juan

Las rocas máficas de composición variable de basalto a andesita que sobreyacen a las rocas volcánicas más antiguas en discordancia erosional y a las rocas mesozoicas con marcada discordancia angular y erosional, fueron definidos como Grupo San Juan por Segerstrom (*op. cit.*). Afloran ampliamente formando extensas mesetas altas, como el Cerro El Gorrión y conos volcánicos aislados entre la Sierra de Pachuca y Tula de Allende. También forma la cima de altas colinas aisladas, como los cerros La Palma y Xicuco.

La secuencia consiste principalmente en derrames de lava con escasas capas interestratificadas de tobas, brechas volcánicas y conglomerados volcánicos. Según Robin (1982), las características petrológicas de estas rocas las ubican en una serie intermedia entre alcalinas y calcoalcalinas.

En la Sierra de Pachuca, el grupo es conocido con el nombre de Formación San Cristóbal (Geyne, *et al.*, *op cit.*), por el Cerro San Cristóbal (localidad en la que se descubrió la especie mineral cristobalita) ubicado justamente al norte de la ciudad de Pachuca, cuya cima consta de derrames de andesita de olivino y piroxeno. Un cambio de litofacies hacia el poniente, desde basalto a andesita de hornblenda, fue observada por Segerstrom (*op cit.*) en la parte inferior de la sección predominantemente basáltica al noroeste y oeste de Zumpango. El nombre de Andesita Jalpan, se refiere a estas rocas (Hibbrad, 1955).

Su espesor es muy variable, pero no mayor a 400 m, observados en el Cerro El Gorrión. Por sus relaciones estratigráficas con otras rocas y su grado de erosión muy avanzada, se deduce que su edad varía del Plioceno Medio al Plioceno Superior.

Estas rocas volcánicas y otras máficas equivalentes, están interestratificadas localmente con sedimentos clásticos de la Formación Tarango, equivalente de la Formación Atotonilco El Grande de la Cuenca del Río Amajac. En la porción sur del acuífero las erupciones volcánicas que las originaron no fueron explosivas y aparentemente ocurrieron a lo largo de grietas o fallas normales. Cantagrel y Robin (1979) agruparon estas rocas volcánicas con otras mesetas máficas y lavas no diferenciadas que afloran en Guanajuato y Jalisco, a las que consideraron típicas de la parte septentrional del vulcanismo Plio-Cuaternario.

Se han reconocido estas rocas en el subsuelo de los valles del área estudiada, mediante varias perforaciones de pozos de abastecimiento de agua potable, las cuales han penetrado basalto y escorias volcánicas asociadas, a diferentes niveles de profundidad y espesor.

Por otra parte, las secciones geológicas disponibles muestran que estos basaltos se encuentran intercalados con tobas de las Formación Tarango y con las arcillas subyacentes de los depósitos lacustres del Plioceno Medio. Ocurren formando capas lenticulares entre el Cerro Bomintzhá y Cerro El Elefante. En otras zonas, forman capas de considerable extensión continua, tal como ocurre en el Cerro Xicuco, en la zona entre Muntepec y Río Tula y entre los valles de Ajacuba y Tepatepec, donde los basaltos de la Mesa Rincón Los Caballos tienen continuidad lateral en toda la región. De la misma forma, los basaltos que afloran entre Santa María Ajoloapan y la ciudad de Pachuca, tienen continuidad lateral en el subsuelo, sobreyaciendo al Grupo Pachuca en discordancia erosional.

Formación Tarango

Los sedimentos clásticos de relleno de valles antiguos erosionados activan y profundamente por el Río Tula y sus efluentes, fueron relacionados con la Formación Tarango en el área por Segerstrom (op cit.) y por Fries (1962), a partir de la definición original de Bryan (1948) en la localidad tipo ubicada al poniente de la ciudad de México, sobre el flanco poniente de la Sierra Las Cruces.

Gran parte del área está cubierta por la Formación Tarango, la cual aflora extensamente en la zona del parteaguas hidrográfico con la Cuenca de México, entre las poblaciones de Tepeji del Río, Tula de Allende y Ajacuba; en el flanco poniente de la Sierra Actopan; en el flanco oriente de las Sierra Xinthé y sierras ubicadas más al sur; así como en las faldas del Cerro San Miguel de La Cal.

La mayor parte de la formación fue depositada por corrientes de aguas superficiales, por lo que está constituida por gravas, arenas, limos y arcillas, acumulados sobre antiguos cauces fluviales, llanuras de inundación y abanicos aluviales.

Estos sedimentos clásticos están dispuestos generalmente en estratificación horizontal pero sus capas tienden a ser discontinuas lateralmente. También, se intercalan localmente con capas de tobas de grano fino y arenas pumíticas re-transportadas o procedentes de erupciones volcánicas contemporáneas.

Localmente presenta sedimentos lacustres en forma de interestratos de arcillas, margas y tierras diatomáceas, lo que indica una interrupción del drenaje fluvial para formar pequeños lagos de corta duración.

Existen depósitos de lentes de caliza con espesores hasta de 12 m en zonas cercanas a las localidades San Marcos, Atotonilco, Tula, Ajacuba y Tezontepec de Aldama, Hidalgo, así como Apaxco y Hueyoxtla-Tlapanloyan, en el estado de México. Casi en todas estas localidades existen manantiales termales, lo que hace pensar que las calizas tuvieron cierta relación con los manantiales ancestrales (Fries, 1962).

En la localidad tipo, afloran tobas, brechas, gravas volcánicas de origen fluvial y delgadas capas de pómez, todas ligeramente endurecidas (Bryan, *op cit.*) y relacionadas con depósitos de lahar y abanicos aluviales (Fries, 1956).

Vázquez y Jaimes (*op cit.*) en la zona de la localidad tipo, identifican una serie de sucesiones piroclásticas, que comienzan con capas delgadas de pómez de caída y de ceniza-lapilli de oleadas (surges), seguida por gruesos paquetes de tobas y brechas de flujo, generalmente no soldadas, y termina con una capa delgada de cenizas vítreas de nube piroclástica. La Formación Tarango tiene aproximadamente 400 m de espesor total. Fue depositada en una superficie de erosión que se desarrolló sobre todas las unidades litológicas anteriores, de manera que puede encontrarse igualmente encima de las rocas cretácicas más antiguas, como encima de los depósitos lacustres del Plioceno Medio; se presenta interestratificada con los Basaltos San Juan.

La edad de la Formación Tarango se estima que corresponde al Plioceno Superior, basado en principios geológicos y geomorfológicos, por lo que se correlaciona con la Formación Atotonilco El Grande, que se encuentra en la cuenca hidrográfica de los Ríos Amajac y Metztitlán.

Según Fries (1962), la acumulación de los sedimentos que la conforman, comenzó debido a una combinación de causas. Indudablemente la extravasación de las lavas máficas de los Basaltos San Juan, continuamente ocasionaron interrupciones locales del desagüe fluvial. El surgimiento de bloques inclinados debidos a movimiento de fallas normales, también pudo haber sido una de las causas de la sedimentación. Un cambio marcado de clima pudo haber iniciado también la sedimentación de los detritos clásticos, que consistiría en el advenimiento de una mayor aridez, caracterizada por la presencia de lluvias torrenciales y periodos de estiaje. Las secciones geológicas muestran que esta formación está afectada por fallas normales, constituye la mayor parte del relleno granular del valle y sobreyace en discordancia erosional a diferentes unidades más antiguas.

Cuaternario

Derrames de Lava y Conos Cineríticos

Los derrames basálticos de lava y conos cineríticos definidos por Segerstrom (1961) como Basalto del Pleistoceno, posteriormente fueron referidos como Derrames de Lava y Conos Cineríticos de edad cuaternaria por Fries (1962), separándolos de las rocas volcánicas máficas definidas como Basaltos Grupo San Juan, ya que parecen tener menor antigüedad geológica, definida con el criterio de que estos derrames fueron extravasados después de que comenzara a disecarse la Formación Tarango y los conos cineríticos o escoriáceos conservan su forma característica.

Depósitos Clásticos

Corresponden a sedimentos aluviales y fluviales, constituidos por arenas, arcillas y gravas acumuladas sobre la superficie actual del valle y a lo largo del lecho y márgenes de ríos y arroyos. Presenta espesores reducidos y se encuentran cubiertos por suelo residual.

4.2 Geología estructural

Los principales rasgos estructurales corresponden a fallas de tipo normal que se han cartografiado tanto por lineamientos topográficos superficiales, como por el resultado de sondeos geofísicos e interpretación de imágenes de satélite. En general, dan origen a fosas tectónicas donde se han acumulado los sedimentos granulares y volcánicos en los principales valles de la región. Los pilares tectónicos están representados por El Cerro San Miguel al norte y el área de Bomintzhá al sur.

Corresponden a remanentes de rocas calcáreas del Cretácico, que se encuentran aflorando, sin embargo, sus flancos se encuentran cortados por fallas generalmente de tipo normal, aunque en la Sierra San Miguel se ha interpretado una falla de tipo recumbente.

Desde el punto de vista estructural, se presenta deformación correspondiente a los dominios dúctil-frágil y frágil. El primero está representado por la presencia de cabalgaduras intraformacionales, entre las cuales destaca la cabalgadura El Tepozán I, dentro de la secuencia de la Formación El Doctor. También está representado por pliegues anticlinales y sinclinales asimétricos muy puntuales y movimientos capa a capa.

El dominio frágil está representado por sistemas de fallas normales en dos direcciones: NW-SE y NE-SW, algunas con componente lateral. Entre éstas últimas destacan El Sabino, Moctezuma, La Bruja, La Blanca, El Tepozán, El Taña, Cerro Alto, Atotonilco de Tula y Progreso; entre las de orientación NW-SE se identificaron las fallas La Calavera, San Agustín y Bomintzhá. Adicionalmente, mediante el modelo digital de elevación (MDE) se interpretaron las fallas Mixquiahuala, Tepeitic, Muntepec de Madero, Teltitlán de Juárez, Lechuguilla, La Cruz, Ulapa Melchor Ocampo, Ulapa Melchor Ocampo 1, Potrero del Rincón, Locamaye. El Puerco, Cerro Colorado, Mesa Grande, Lázaro Cárdenas 1 y Lázaro Cárdenas 2, las cuales se consideran representativas de un evento distensivo del sistema NE-SW.

Entre las fallas laterales interpretadas destacan Peña Honda y Las Vacas. También se identificaron los lineamientos curvilíneos La Joya y Xithí (Cartas Geológico-Mineras Tula de Allende F14-C88 (2010) y Mixquiahuala F14-C89 (2009) del SGM. Escala 1:50,000).

A partir del análisis de imágenes de satélite se identificaron estructuras anulares que pueden relacionarse con domos, calderas o intrusivos cercanos a la superficie y dos sistemas de lineamientos casi rectos con orientación SW-NE y E-W. Los primeros se asocian con posibles calderas localizadas en las inmediaciones del Cerro Colorado, al E-NW del Cerro La Cruz y en la cercanía del Cerro Peña Colorada, además de un lineamiento casi circular localizado al SW, que puede asociarse a una estructura dómica sepultada.

Las estructuras sedimentarias forman parte de la estribación poniente de la Sierra Madre Oriental. Son parte de una cadena montañosa compuesta por rocas marinas mesozoicas plegadas que vergen hacia el oriente con un rumbo de plano axial N-S, producto de una fase tectónica de deformación ocurrida del Cretácico Superior a principio del Cenozoico, que originó además de numerosas estructuras plegadas, corrimientos que dieron lugar a fallas inversas (Carta Geológico-Minera Ixmiquilpan F14C79, SGM 1995. Escala 1:50000). Existen muy pocas evidencias de los eventos tectónicos ocurridos antes del Turoniano-Campaniano, época en la cual se interrumpe la transgresión marina y el depósito de sedimentos carbonatados y se inicia el levantamiento gradual del norponiente de México, desde el poniente al oriente, que se manifiesta por un importante aporte de sedimentos turbidíticos.

A finales del Cretácico y principios del Cenozoico, inicia la fase de deformación atribuida a la Orogenia Laramide. Hacia el Mioceno Tardío inició el vulcanismo que dio origen al Eje Neovolcánico, al mismo tiempo que se generaron calderas distribuidas a lo largo de dicha provincia geológica, así como la formación de volcanes hasta la actualidad. El orógeno laramídico propició un estilo de deformación de cobertura con dirección al NW-SE y E-W en menor proporción; mientras que la fase distensiva postmiocénica superior dio lugar a fallas orientadas N-S. En síntesis, se identifican dos importantes fases de deformación: una compresiva del Cretácico Tardío al Paleoceno; y otra de extensión que ocurre entre el Plioceno y el Pleistoceno, que afecta a toda la secuencia litoestratigráfica.

En el Plioceno Tardío, la actividad volcánica alcanza su clímax con el desarrollo de calderas y vulcanismo post-caldera; así como fallamientos de gravedad que delimitaron cuencas endorreicas y fosas tectónicas en donde se acumularon lagos que recibieron aporte de sedimentos lacustres. La etapa culmina con la erupción de basaltos a través de fisuras y conos monogenéticos (Carta Geológico-Minera Tula de Allende F14-C88, SGM 2010. Escala 1:50 000).

4.3 Geología del subsuelo

Con base a la información geológica y geofísica recabada, es posible definir los espesores y la geometría del subsuelo del acuífero. La mayor parte del subsuelo se encuentra constituida por sedimentos y materiales granulares de origen continental, interdigitados con depósitos vulcanoclásticos. La unidad inferior está alojada en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están constituidas por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento y por rocas marinas calcáreo-arcillosas del Cretácico, de las que se desconoce su potencial geohidrológico.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **libre a semiconfinado**; heterogéneo y anisótropo constituido, en su porción superior, por una alternancia de materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y sedimentos piroclásticos, que en conjunto presentan permeabilidad media y espesor promedio de 400 m; en su porción inferior está conformado por rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras, barreras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están representados por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento, especialmente las rocas riolíticas Don Guinyó y del Grupo Pachuca, El Grupo El Morro y a mayor profundidad la secuencia de lutitas, limolitas y areniscas que constituyen las formaciones Mexcala y Soyatal.

A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas pueden alojar un acuífero confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas, cuya manifestación se presenta en algunos pozos artesianos en el área de San Salvador, localizado en el acuífero vecino Actopan-Santiago de Anaya.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2012-2013 se ejecutaron 6 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 10 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, existe información de al menos 70 pruebas más realizadas en estudios previos (LEASA, 2007; CFE, 1996; SARH, 1981).

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores de transmisividad varían de **4.0×10^{-6} a $183.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . En tanto que la conductividad hidráulica oscila entre **4.0×10^{-7} y $1.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (0.035 a 103.7 m/d)**.

En la zona donde predominan los basaltos los valores de transmisividad varían de 10.0 a 50.0 $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que, en las porciones sur y norte, en donde afloran principalmente rocas volcánicas, los valores oscilan 1.0 y 10.0 $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

A nivel regional, 12 pruebas de bombeo contaron con pozo de observación para poder estimar el coeficiente de almacenamiento, el cual varía de 0.0002 a 0.2. De manera general, los valores más altos de los parámetros hidráulicos corresponden a las rocas basálticas fracturadas y los menores a los sedimentos aluviales y piroclásticos de grano fino.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea y con el objetivo de evaluar una condición actual del acuífero, para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2007-2012.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En 2012, la profundidad al nivel estático presentaba valores que variaron de 50 m a 180 m; en la parte occidental del acuífero, donde se localiza el poblado Ajacuba, el agua se encuentra a profundidades que varían de 60 a 70 m, mientras que hacia el oriente el nivel estático se profundiza a más de 100 m.

En el estrechamiento topográfico oriental, donde termina el acuífero, se registraron niveles entre 130 y 180 m de profundidad (figura 3). De manera general la profundidad se incrementa hacia el oriente y hacia los extremos norte y sur, conforme se asciende topográficamente.

Al sureste del acuífero, hacia la localidad Chapultepec de Pozos, y en al occidente de Ajacuba, se presentan niveles freáticos someros que son explotados mediante norias.

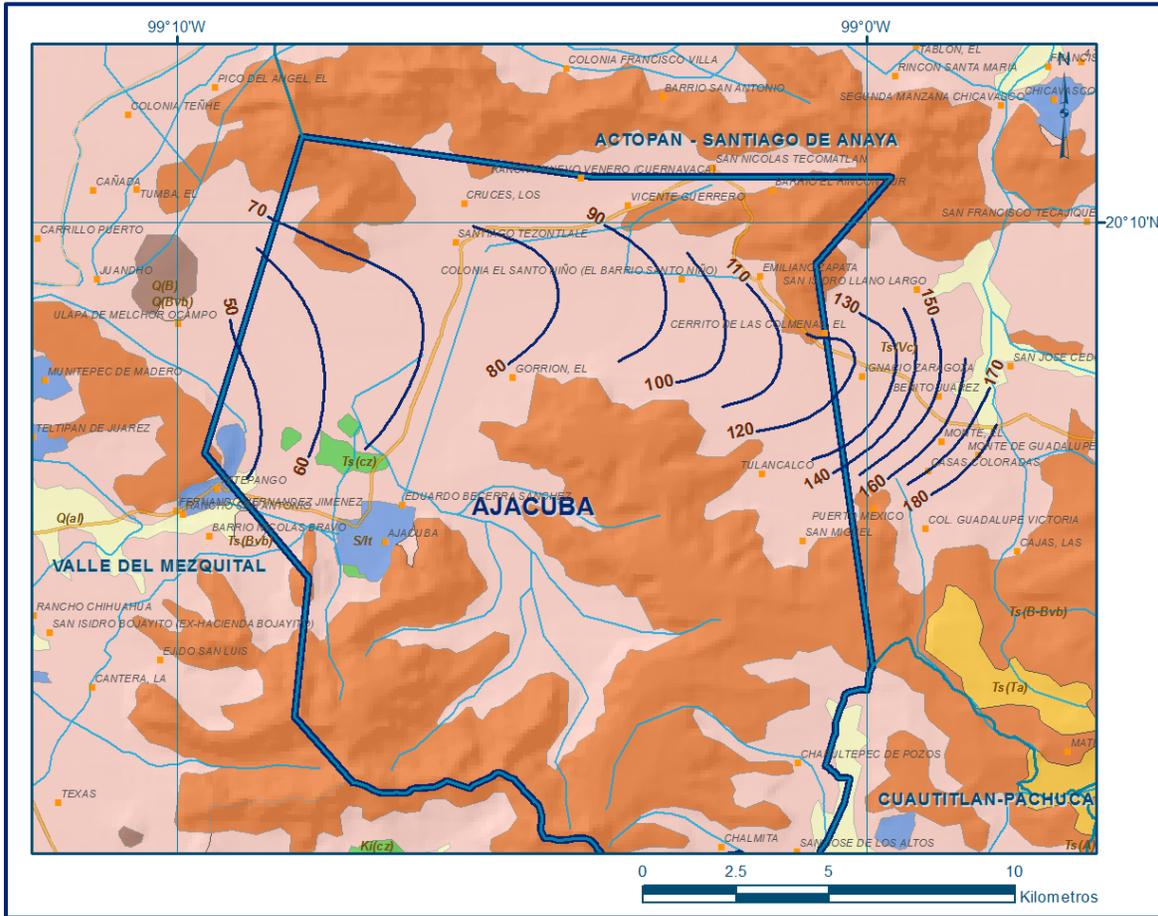


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2012)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en el 2012, presenta valores que varían de 2007 msnm, que se registran en el extremo occidental del acuífero, incrementándose por efecto topográfico, al igual que la profundidad, hacia la porción oriental hasta 2025 msnm, indicando una dirección preferencial del flujo subterráneo de este a oeste, con bajo gradiente hidráulico (figura 4).

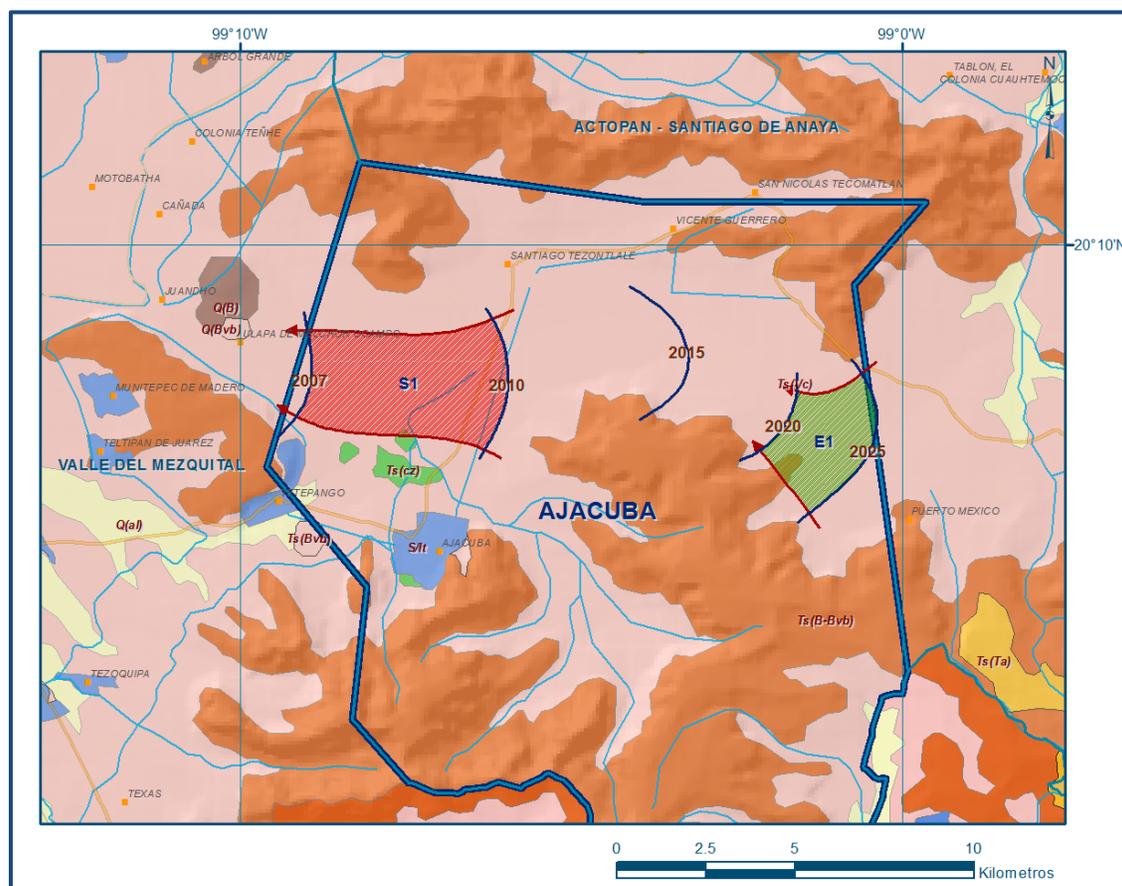


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2012)

5.4.3 Evolución del nivel estático

De acuerdo con la información piezométrica disponible para el periodo 2007-2012, la evolución registra valores puntuales tanto de recuperación como de abatimiento que tienden a anularse y como consecuencia el cambio de almacenamiento es prácticamente nulo.

Sólo en la poción baja del acuífero, entre los poblados Ajacuba y Tezontlale, se registra una recuperación del nivel estático de 3 m, que representan 0.6 m anuales. En general, en la mayor parte de la superficie del acuífero los niveles del agua subterránea no muestran variaciones significativas en su posición.

De esta manera se conserva la red de flujo subterráneo debido a que la recarga inducida mantiene constantes los niveles, a que el acuífero llegó a un estado de saturación de su capacidad de almacenamiento y a que los excedentes se manifiestan como descargas naturales.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos realizados en 2012-2013, se recolectaron 5 muestras de agua subterránea, distribuidas en la superficie del acuífero para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros biológicos, físicos, químicos, metales, inorgánicos, radioactividad, compuestos aromáticos y orgánicos, plaguicidas y contaminantes emergentes, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación, conocer las condiciones de calidad del agua subterránea y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Como parámetros biológicos se realizaron determinaciones de huevos de helminto, salmonella, estreptococos fecales, coliformes fecales y coliformes totales. Las determinaciones de huevos de helminto, salmonella y shigella, resultaron ausentes en los sitios, así como los estreptococos fecales y los coliformes fecales.

Los parámetros físicos determinados fueron conductividad eléctrica, temperatura, pH, potencial Redox (Eh), olor, sabor, color y turbiedad. La conductividad eléctrica varía de 940 a 2,820 $\mu\text{mhos/cm}$ en el agua subterránea. La temperatura del agua en el acuífero se puede clasificar en un grupo de agua con bajo grado de termalismo, con temperaturas entre 27 y 34 °C.

Los valores de pH registrados varían de 6.5 a 8.2 que se encuentran dentro del rango establecido por la modificación a la 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; los valores de Eh en las muestras de agua subterránea varían de 0.89 a 161 mV.

De acuerdo con la misma norma, el límite máximo permisible (LMP) de turbiedad para el agua destinada al uso y consumo humano, es de 5 UTN. En las muestras de agua subterránea analizadas, se encontraron valores bajos, de 0 a 0.4; en contraste, en el agua superficial de los canales, se reportaron valores de turbiedad entre 3 y 100 UTN.

Con respecto al color, olor y sabor del agua se encuentran dentro de los límites establecidos en la norma para el agua subterránea. Los parámetros químicos analizados fueron los sólidos totales disueltos (STD) y las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) que corresponde a jabones y detergentes.

Los valores de STD varían de 688 a 2,235 mg/l, los niveles más profundos presentan diferentes concentraciones, pero predominan las menores de 1000 mg/l que establece la modificación a la 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. (2000) como LMP para el agua destinada al consumo humano; los resultados de SAAM se encuentran dentro de la norma.

En las muestras de agua subterránea analizadas se encontró arsénico y sodio. La concentración de arsénico está fuera de la norma en una de las muestras, el valor máximo encontrado fue de 0.42 mg/l mientras que el LMP en la norma es de 0.025 mg/l. El sodio se encontró fuera de los límites de la norma (200 mg/l) en una de las muestras, con valor de 451 mg/l.

De los parámetros inorgánicos analizados solo se encuentra fuera de norma en una de las muestras de agua subterránea el nitrógeno amoniacal con valor de 1.3, mientras que el LMP es 0.5 mg/l.

También se detectó radioactividad alfa tanto en los niveles someros como los profundos del acuífero. Tiene un origen natural a partir de los minerales que constituyen el subsuelo y están relacionados con los focos geotérmicos.

En las muestras de agua subterránea analizadas se encontraron valores mínimos de 0.099 y máximos de 1.32 Bq/l, el LMP de radioactividad alfa es de 0.56 Bq/l.

Algunos compuestos aromáticos y orgánicos se encontraron en concentraciones muy bajas, excepto los trihalometanos con valores máximos de 0.9 mg/l en una muestra que sobrepasan el LMP que es de 0.2 mg/l. No se detectaron concentraciones de ninguno de los plaguicidas analizados ni de compuestos semivolátiles, volátiles, hormonas y fenoles.

Del total de los 224 compuestos emergentes analizados (fenoles etoxilados, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles, compuestos originados por fármacos y productos para el cuidado personal y hormonas), sólo 25 fueron detectados en las muestras de agua subterránea y no exceden los rangos establecidos en la norma oficial.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion predominante, las familias de agua predominantes son la sódica-bicarbonatada, cálcica-bicarbonatada, mixta y sulfatada-clorurada.

Las dos primeras indican agua de reciente infiltración y tiempo corto de residencia que ha circulado a través de rocas volcánicas; en tanto que las otras dos se asocian a mezcla de aguas y a la contaminación causada por las actividades antropogénicas.

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 2012-2013, se censaron 45 aprovechamientos de los cuales 35 están activos y 10 inactivos, del total de aprovechamientos activos 15 son pozos, 18 norias y 2 manantiales. De las obras activas, 2 son para uso agrícola, 17 para uso doméstico, 12 para uso público-urbano y 4 para uso recreativo; que en conjunto extraen un volumen de **5.0 hm³/año**, de los cuales 0.50 hm³ (10.0%) son para uso agrícola, 0.02 hm³ (0.4 %) para uso doméstico, 4.13 hm³ (82.6%) para uso público-urbano y 0.35 hm³ (7.0%) para uso recreativo.

Adicionalmente, a través de los **manantiales** se descarga un volumen de **0.6 hm³ anuales** destinados principalmente al uso público-urbano.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2007-2012, en una superficie aproximada de **90 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

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 que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego (Rc); del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado (Rpu) constituyen otras fuentes 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 definida por la expresión:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Ri:** Recarga inducida
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- ETR:** Evapotranspiración
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm:** Descargas por manantiales
- Dc:** Descarga a través de canales
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2012, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

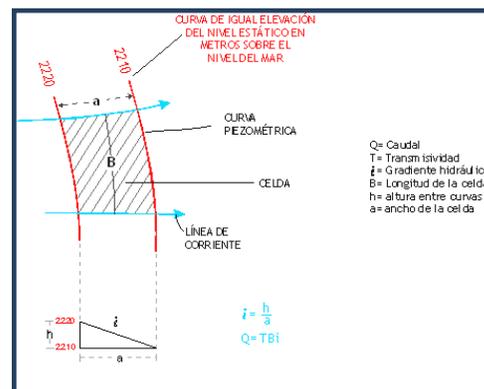
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico (i);

T= Transmisividad en el canal de flujo;



La recarga total por flujo 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 y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **0.6 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2012 y otros previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2012)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	3170	2330	5	0.0021	0.0030	0.0204	0.6
Total entradas							0.6

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Como se mencionó anteriormente, la recarga inducida (Ri) tiene varias componentes: la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr), de los canales de distribución de agua superficial (Rc) y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado (Rpu).

$$R_i = R_r + R_c + R_{pu}$$

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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 de láminas de riego por cultivo, el volumen del agua que retorna al acuífero se dedujo del balance hidrometeorológico en el que la evapotranspiración es del 80 %; por lo tanto, se considera que aproximadamente un 20% del agua aplica retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, lo cual es consistente con la permeabilidad media a baja de los sedimentos del subsuelo, la profundidad somera al nivel estático y la existencia de drenes.

De esta manera, tomando en cuenta que el volumen neto de agua superficial, aplicado al riego en el distrito de riego, es de 28.5 hm^3 al año, de los cuales 28.0 hm^3 corresponden a agua superficial y 0.5 hm^3 son agua subterránea. Por lo tanto, el volumen por el retorno del riego **(Rr) = 5.7 hm^3 anuales.**

Para la estimación de la recarga a través de los canales (Rc) se tomó en cuenta el promedio de los últimos 10 años de los volúmenes totales de entrada a los distritos de riego (volumen bruto) y el volumen real que reciben los módulos (volumen neto).

La diferencia entre ellos se considera que de manera aproximada representa la infiltración a lo largo de los canales de distribución, una vez descontado el volumen evaporado a lo largo de su conducción.

De esta manera si el volumen bruto es de 40.0 hm³ anuales y el volumen neto es de 28.00 hm³ anuales, la recarga a lo largo de los canales es de 12.0 hm³, que representa aproximadamente el 30% del volumen bruto. **Rc = 12.0 hm³ anuales.**

Por otra parte, el volumen de agua subterránea destinado al uso público-urbano es de 4.7 hm³ anuales, de los cuales 4.1 hm³ corresponden a agua subterránea y 0.6 hm³ al agua procedente de los manantiales.

Considerando que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y que un 30 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo Rpu es de **1.4 hm³ anuales.**

Por lo tanto, la recarga inducida:

$$R_i = R_r + R_c + R_{pu}$$

$$R_i = 5.7 + 12.0 + 1.4$$

$$R_i = 19.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), descarga a través de manantiales (Dm). No existe descarga por flujo base.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **5.0 hm³/año.**

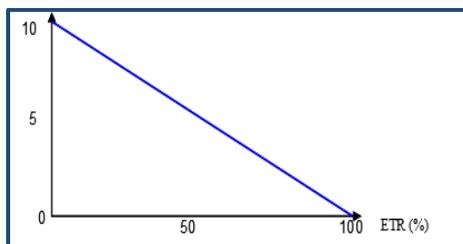
7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura de 16 °C y precipitación 550 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 450.5 mm.

COUTAGNE	$ETR = P - \chi P^2$	
Donde:	P (m) =	0.550
ETR= Evapotranspiración m/año	t (°C) =	16.0
P = precipitación en m/año	ETR (m/año) =	0.4505
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$		
t = temperatura en °C		

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



En la porción suroriental del acuífero, en la zona del poblado Chapultepec de Pozos, se midieron niveles freáticos someros menores de 10 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración hasta donde penetran las raíces de las plantas en este tipo de clima, que son explotados mediante norias.

De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando la superficie de 8.0 km² en la que se presentan niveles freáticos someros, por la lámina de evapotranspiración (ETR) obtenida de 450.5 mm anuales, en la que profundidad promedio al nivel estático (PNE) es de 7 m; de acuerdo con la gráfica que muestra la relación lineal inversa entre el % de ETR y la PNE, le corresponde el 30%.

$$ETR = (8.0 \text{ km}^2) (0.4505 \text{ m/año}) (0.3) = 1.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

$$\mathbf{ETR = 1.1 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las descargas 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. El valor calculado es de **0.1 hm³ anuales**, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2012)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2790	5185	3	0.0006	0.0020	0.0032	0.1
Total Salidas							0.1

7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)

A través de los manantiales se descarga un caudal conjunto de 19 lps, que representan un volumen de **0.6 hm³ anuales**.

7.2.5 Descarga a través de canales y drenes (Dc)

De acuerdo con los aforos realizados en el dren Ajacuba, actualmente se drena artificialmente hacia el Valle del Mezquital un volumen de **15 hm³ al año**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la evolución del nivel estático para el periodo 2007-2012. Con base en ella y considerando un rendimiento específico Sy = 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 90 km², 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 (km²);

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

Sólo en una superficie de 64.5 km² se registran recuperaciones, en los 25.5 km² restantes los niveles del agua subterránea no muestran cambios significativos en su posición a lo largo del tiempo.

Si tomamos en cuenta que en esta área la recuperación promedio anual es de 0.6 m (3.0 m en el periodo 2007-2012) y el valor del rendimiento específico de 0.1:

$$\Delta VS = (0.1) (64.5 \text{ km}^2) (0.6 \text{ m}) = 3.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto **$\Delta V(S) = 3.9 \text{ hm}^3$ anuales.**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

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

Sustituyendo valores:

$$Rv = 5.0 + 1.1 + 0.1 + 0.6 + 15.0 - 19.1 - 0.6 + 3.9$$
$$Rv = 6.0 \text{ hm}^3$$

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

$$R = Rv + Eh + Ri$$
$$R = 6.0 + 0.6 + 19.1$$
$$R = 25.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$\text{DMA} = \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \quad (3)$$

Donde:

DMA: Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

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 a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **25.7 hm³/año**; que corresponden a la recarga natural y la recarga inducida.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida corresponde a la suma de la descarga a través de canales y la descarga a través de manantiales. Por lo tanto, la **DNC = 15.6 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **5,187,226 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 25.7 - 15.6 - 5.187226 \\ \text{DMA} &= 4.912774 \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,912,774 m³ anuales**.