



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO IXCAQUIXTLA (2106), ESTADO DE
PUEBLA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1. Provincia fisiográfica.....	6
3.2. Clima.....	7
3.3. Hidrografía.....	7
3.4. Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	10
4.2. Geología estructural.....	19
4.3. Geología del subsuelo.....	20
5. HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1. Tipo de acuífero.....	21
5.2. Parámetros hidráulicos.....	21
5.3. Piezometría.....	22
5.4. Comportamiento hidráulico.....	22
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1. Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	24
7.2. Salidas.....	29
7.2.2. Extracción por bombeo (B).....	29
7.2.3. Descarga a través de manantial (Dm).....	29
8. DISPONIBILIDAD	30
8.1 Recarga total media anual (R).....	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA	32

1. GENERALIDADES

Antecedentes

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

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

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

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

1.1. Localización

El acuífero Ixcaquixtla, definido con la clave 2106 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se ubica en la porción sur del estado de Puebla, en los límites con los estados de Guerrero y Oaxaca, entre los paralelos 17° 51' y 18° 57' de latitud norte y los meridianos 97° 37' y 99° 04' de longitud oeste; abarcando una superficie aproximada de 9,559 km².

Limita al norte con los acuíferos Valle de Puebla y Valle de Tacamachalco, pertenecientes al estado de Puebla; al este con los acuíferos Valle de Tehuacán, del estado de Puebla, y con el acuífero Huajuapán de León, perteneciente al estado de Oaxaca; al sur con los acuíferos Mariscala, del estado de Oaxaca y Tlapa-Huamuxtitlán del estado de Guerrero; al este con los acuíferos Huitzucos del estado de Guerrero y Atlixco-Izúcar de Matamoros, perteneciente al estado de Puebla (figura 1).

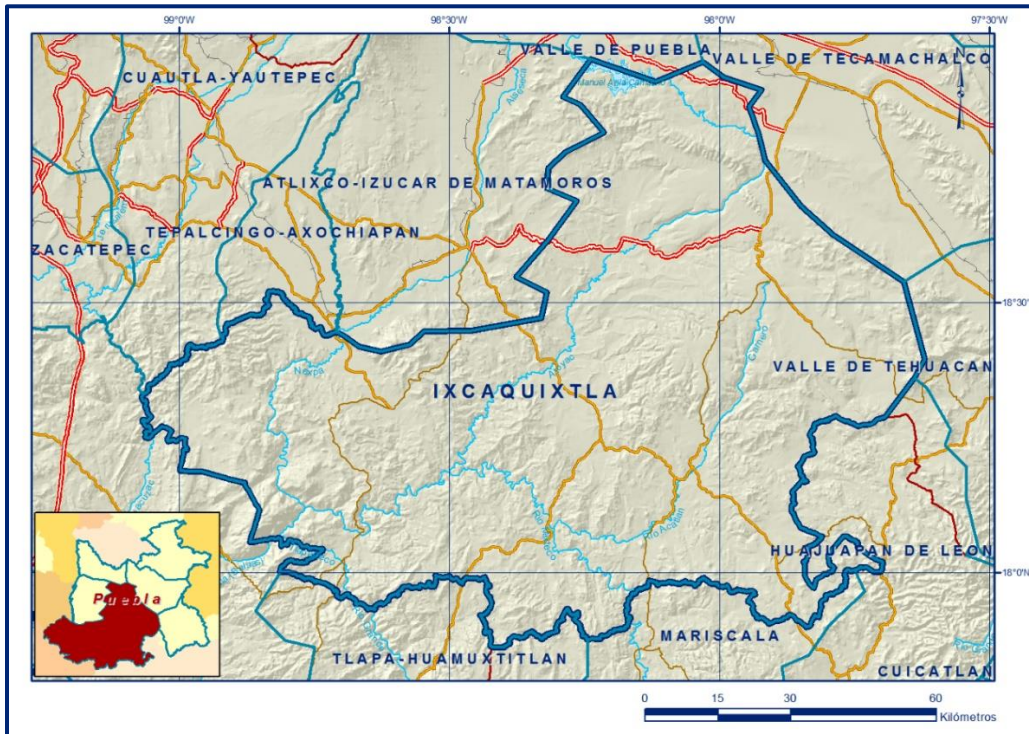


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el área del acuífero abarca en su totalidad los municipios Acatlán, Ahuatlán, Ahuehuetitla, Albino Zertuche, Axutla, Chiautla, Chietla, Chigmecatitlán, Chila, Chila de la Sal, Chinantla, Coatzingo, Cohetzala, Coyotepec, Cuautinchán, Cuauya de Andrade, Guadalupe, Huatlatlauca, Huehuetlán El Chico, Huehuetlán El Grande, Ixcamilpa de Guerrero, Ixcaquixtla, Jolalpan, Juan N. Méndez, La Magdalena Tlatlauquitepec, Petlalcingo, Piaxtla, San Jerónimo Xayacatlán, San Juan Atzompa, San Miguel Ixitlán, San Pablo Anicano, San Pedro Yeloixtlahuaca, Santa Catarina Tlaltempan, Santa Inés Ahuatempan, Tecomatlán, Tehuizingo, Teotlalco, Tepexi de Rodríguez, Totoltepec de Guerrero, Tulcingo, Tzicatlacoyan, Xayacatlán de Bravo, Xicotlán, Zacapala; y parcialmente los municipios Atexcal, Cuautinchán, Izúcar de Matamoros, Molcaxac, Tecali de Herrera, Teopantlán y Puebla.

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 que delimitan al acuífero.

ACUIFERO 2106 IXCAQUIXTLA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	42	23.3	18	26	40.4	
2	98	41	54.7	18	26	24.7	
3	98	40	2.1	18	25	9.9	
4	98	37	37.3	18	24	33.7	
5	98	34	25.5	18	25	22.0	
6	98	32	51.2	18	26	50.8	
7	98	27	32.1	18	26	56.3	
8	98	19	50.5	18	28	19.6	
9	98	19	13.8	18	31	8.2	
10	98	22	38.7	18	32	50.6	
11	98	19	3.7	18	36	58.9	
12	98	15	51.2	18	41	20.2	
13	98	19	10.4	18	42	42.3	
14	98	19	3.0	18	44	57.7	
15	98	17	6.7	18	46	46.5	
16	98	12	52.9	18	48	56.4	
17	98	15	29.2	18	52	2.2	
18	98	17	26.1	18	52	52.8	
19	98	14	21.2	18	57	4.3	
20	98	7	6.2	18	54	35.4	
21	98	1	50.8	18	56	44.5	
22	97	59	30.2	18	55	2.9	
23	97	55	19.2	18	53	37.7	
24	97	56	44.3	18	51	45.7	
25	97	55	38.6	18	48	41.1	
26	97	54	59.4	18	45	50.4	
27	97	50	58.0	18	40	41.7	
28	97	47	21.1	18	37	30.8	
29	97	39	33.3	18	32	20.1	
30	97	37	12.0	18	23	43.9	
31	97	38	22.3	18	21	39.3	
32	97	41	37.5	18	17	16.1	DEL 32 AL 33 POR EL LIMITE ESTATAL
33	97	44	59.4	18	0	17.8	DEL 33 AL 34 POR EL LIMITE ESTATAL
34	98	14	40.1	17	52	35.5	DEL 34 AL 35 POR EL LIMITE ESTATAL
35	98	25	24.5	17	51	51.5	DEL 35 AL 36 POR EL LIMITE ESTATAL
36	98	48	49.0	18	0	5.9	DEL 36 AL 37 POR EL LIMITE ESTATAL
37	99	3	55.2	18	19	53.7	DEL 37 AL 38 POR EL LIMITE ESTATAL
38	98	55	10.0	18	26	5.4	DEL 38 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	42	23.3	18	26	40.4	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Ixcaquixtla pertenece al Organismo de Cuenca IV “Balsas” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Puebla. El acuífero se encuentra parcialmente vedado. La porción norte, que comprende parcialmente los municipios de Puebla, Teopantlán y Cuautinchán, está sujeta a la disposición del *“Decreto que amplía por tiempo indefinido la veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo establecida para la Zona Meridional del Estado de Puebla, mediante decreto del 12 de junio de 1967 en los municipios de Amozoc, Puebla, Calpa, Totimehuacán.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 30 de agosto de 1969. De igual manera, parte de los municipios Izúcar de Matamoros y Tecali de Herrera, ubicados al oeste y norte del acuífero, respectivamente, está sujeta a las disposiciones del *“Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Zona Meridional del Estado de Puebla”*, publicado en el DOF el 15 de noviembre de 1967. Ambos decretos son de tipo III, en los que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La mayor parte de su territorio no está vedado. La porción no vedada del acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, se encuentra sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del 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 lo establecido por 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 uso principal del agua subterránea es el agrícola. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca del Río Balsas decretado el 26 de marzo de 1999. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero no se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos de evaluación, el único realizado en su superficie es el siguiente:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO IXCAQUIXTLA, EN EL ESTADO DE PUEBLA, elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C. para la Comisión Nacional del Agua, en 2011. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento del número de aprovechamientos del agua subterránea y obtener información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático (profundidad y elevación), para en una etapa posterior plantear el balance y determinar la disponibilidad. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance hidrometeorológico. Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizarán en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

Fisiográficamente la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincias Cuenca Balsas-Mezcala y Río Tlapaneco (Raisz E., 1964). Estas Subprovincias limitan al norte con la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico y al sur con la Subprovincia de la Vertiente del Sur, perteneciente a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur. Una pequeña zona de la porción norte del acuífero, se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico.

La Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, lugar en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm.

Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que está separada por la Depresión del Balsas.

El Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur se enlazan en el norte de Oaxaca, en el Escudo Mixteco. Su altitud media es de 2000 msnm, el punto más alto es el cerro Quie Yelaag que está a una altura de 3710 msnm, en el sur de Oaxaca. Al occidente, esta sierra empieza como Sierra del Alo, en los municipios de Tecalitlán y Pihuamo en Jalisco, posteriormente atraviesa Michoacán, donde se conoce como sierra de Coalcomán. Después de cruzar el río Balsas, entra al occidente de Guerrero donde se le conoce como Cumbres de La Tentación. Atraviesa todo Guerrero y en sus límites con Oaxaca es conocida como Sierra de Coicoyán. Es surcada por numerosos ríos, los cuales forman grandes y profundos cañones, principalmente en Guerrero, donde las partes altas son conocidas como “filos”.

Las Subprovincias Cuenca Balsas-Mezcala y Río Tlapaneco están conformadas por “profundos y sinuosos valles a lo largo de los cuales los ríos Balsas y Tepalcatepec han ido labrando las sierras en algunas partes de 3000 m de altura dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta” (Raisz, 1964). En general presentan calizas y conglomerados en sus partes altas que muestran un aspecto redondeado; con drenaje ampliamente espaciado; mientras que, por otro lado, los valles, laderas y partes bajas están constituidas por lutitas, areniscas, limolitas y rocas ígneas que conforman lomeríos con pendientes muy suaves y con un drenaje bien desarrollado.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero Ixcaquixtla predominan los tipos de clima siguientes: cálido subhúmedo, semiseco muy cálido y semiseco subhúmedo. En la porción noreste domina el clima templado subhúmedo. Todos ellos con régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la cartografía digital de INEGI. Mediante las curvas de isoyetas e isotermas medias se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **785 mm** y **24.0 °C**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio es del orden de **1950 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

De acuerdo a su ubicación geográfica, el área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, la cual está limitada por las Sierras Madre del Sur y de Juárez, así como por el Eje Neovolcánico.

Tiene la forma de una depresión muy alargada con valles muy angostos, cuyo territorio está formado en su mayor parte por elevaciones con fuertes pendientes y un arreglo geológico poco propicio para el control y almacenamiento de los grandes escurrimientos.

Se ha dividido en las Subregiones Hidrológicas Alto, Medio y Bajo Balsas. El acuífero Ixcaquixtla se encuentra en la subregión Alto Balsas, integrada por las cuencas hidrológicas Río Libres Oriental, Río Alto Atoyac, Río Nexapa, Río Bajo Atoyac, Río Mixteco, Río Tlapaneco y Río Amacuzac. En su porción norte se ubica la Presa Manuel Ávila Camacho o Valsequillo, que capta el agua del Río Alto Atoyac. Las corrientes más importantes son los ríos Mixteco y Tlapaneco.

El Río Mixteco tiene sus orígenes en la vertiente occidental de la Sierra de Oaxaca, en la región Mixteca, 25 km al sur-suroeste del poblado de Santa María La Asunción Tlaxiaco, Oaxaca, donde se forma con las aportaciones de los ríos Tlaxiaco y Mixtepec y más adelante confluye el río Salado, considerado en esta región como el colector general. El Río Tlapaneco se origina en la unión de dos corrientes: el Río Coicoyán o Salado que descienden de elevaciones de 1,750 msnm de la Sierra de Coicoyán, en el estado de Oaxaca, y el Río Atencochayota, que desciende de elevaciones de 1,600 msnm de la Sierra de Malinaltepec, en el estado de Guerrero.

3.4. Geomorfología

El paisaje geomorfológico de la zona se caracteriza por estar constituido por sierras, barrancas profundas y valles intermontanos estrechos, las laderas de las barrancas y valles definen pendientes mayores al 35%.

Las elevaciones máximas superan los 2500 msnm y se asocian con las zonas de cabalgaduras, pliegues anticlinales y con el emplazamiento de rocas intrusivas y volcánicas; se encuentran orientadas en una dirección NS y NNE-SSW y comunmente se forman en la secuencia de rocas calcáreas, sin embargo la secuencia mesozoica metamorfizada del Terreno Guerrero debido a su carácter alóctono, configura unidades homogéneas que adquieren elevaciones mayores a 2500 msnm. Por otra parte, en las rocas ígneas no se manifiesta continuidad longitudinal, ocurriendo sus relieves de manera local y aislada.

Dentro del contexto geológico regional, las unidades hidrogeológicas se encuentran comprendidas en los Terrenos Tectonoestratigráficos Guerrero y Mixteco (Campa y Coney, 1983), de tal forma que el relieve que conforman actualmente estos bloques, guarda una relación estrecha con la compleja evolución tectónica a que estuvieron sujetos, específicamente durante la deformación compresiva Laramídica, evento tectónico que generó el plegamiento de las carpetas sedimentarias mesozoicas. Por otra parte, de manera menos trascendente, la actividad ígnea extrusiva e intrusiva, ocasionó modificaciones en el relieve asociado al plegamiento, en donde estos procesos exógenos (vulcanismo) y endógenos (intrusiones) produjeron un rejuvenecimiento de las características topográficas de la región en donde ocurrió su emplazamiento, configurando la unidad geomorfológica de sierras.

Bajo esta perspectiva, se considera que el paisaje geomorfológico que exhibe la región, es consecuencia principalmente de las estructuras plegadas, que ocasionaron el engrosamiento estructural en las zonas en donde se tienen repeticiones de la columna estratigráfica asociadas con fallas de cabalgadura, con su consecuente incremento de relieve en el bloque cabalgante y una disminución del mismo en el bloque cabalgado. Relación similar se aprecia en las zonas dominadas por pliegues anticlinales y sinclinales, en donde los altos topográficos (sierras) corresponden con los primeros, en tanto que los valles y lomeríos están localizados en las segundas estructuras.

El factor litológico también tiene implicaciones directas con la presencia de los contrastes geomorfológicos: las rocas competentes (calizas, conglomerados, areniscas, andesitas, riolitas, granitos y rocas metamórficas) tienen un comportamiento más resistente a los agentes erosivos y tienden a configurar patrones de drenaje de tipo sub-paralelo y paralelo; en tanto que las rocas incompetentes (representadas por las secuencias tipo flysch de lutitas y areniscas, o bien, lutitas y margas), así como por la secuencia de tobas y materiales piroclásticos asociados con un vulcanismo explosivo (flujos de piroclastos, depósitos de caída); se encuentran bien caracterizadas por el desarrollo de un sistema de drenaje dendrítico, derivado de la gran facilidad con que son erosionadas.

Los sistemas de fracturas y fallas ejercen también una influencia dentro de la formación de depresiones, cañadas y barrancas derivadas del rompimiento súbito de la continuidad longitudinal de fragmentos homogéneos y su disección lineal.

4. GEOLOGÍA

Las diferentes unidades litológicas comprenden rocas metamórficas, sedimentarias marinas tanto de plataforma como de cuenca, rocas ígneas extrusivas y en menor proporción rocas ígneas intrusivas, las cuales en ocasiones se encuentran en contacto ya sea por medio de fallas de cabalgadura o bien por fallas laterales inversas, que le confieren una gran complejidad estructural. En la figura 2 se presenta la geología regional del acuífero. Desde el punto de vista de los Terrenos Tectonoestratigráficos, definidos por Campa y Coney (1983), el acuífero pertenece a los Terrenos Mixteco y Guerrero. Las rocas que forman parte de ellos están cubiertas parcialmente e intrusionadas por rocas asociadas al magmatismo de la Sierra Madre del Sur. Las rocas vulcanosedimentarias metamorfoseadas, manifiestan características litológicas y estructurales que permiten considerarlas como parte del Terreno Tectonoestratigráfico Guerrero, el cual se divide en tres subterrenos: Zihuatanejo, Huétamo-Arcelia y Teloloapan, cuyos límites estructurales están representados por fallas de cabalgadura (Campa y Coney 1983). El Subterreno Teloloapan manifiesta el evento de acreción de la secuencia de arco volcánico sobre la margen continental, representada por las rocas de la plataforma Guerrero-Morelos (Terreno Mixteco). La gran diversidad de rocas que están presentes en el sur de México, son reflejo de la complejidad estructural y estratigráfica que presenta la región, relacionadas con su evolución tectónica en este sector ubicado en los límites entre los estado de Guerrero, Oaxaca y Puebla.

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica que aflora en la región está constituida por rocas cuyas edades varían del Paleozoico al reciente. A continuación, se describen las distintas unidades, de la más antigua a la más reciente:

PALEOZOICO

Complejo Acatlán

Está formado por una secuencia plegada y afectada por metamorfismo regional, la cual ha sido estudiada por varios autores (Ordóñez, 1906; Jenny, 1933; Salas, 1949; Fries, 1960; Rodríguez-Torres, 1970); esta secuencia fue formalmente definida por Ortega-Gutiérrez (1978), quién la propuso como unidad litoestratigráfica equivalente a grupo, el cual incluye cinco formaciones estratiformes (Magdalena, Chazumba, Cosoltepec, Xayacatlán y Tecomate) y tres intrusivos (Granitoides Esperanza, Tronco de Totoltepec y Diques San Miguel).

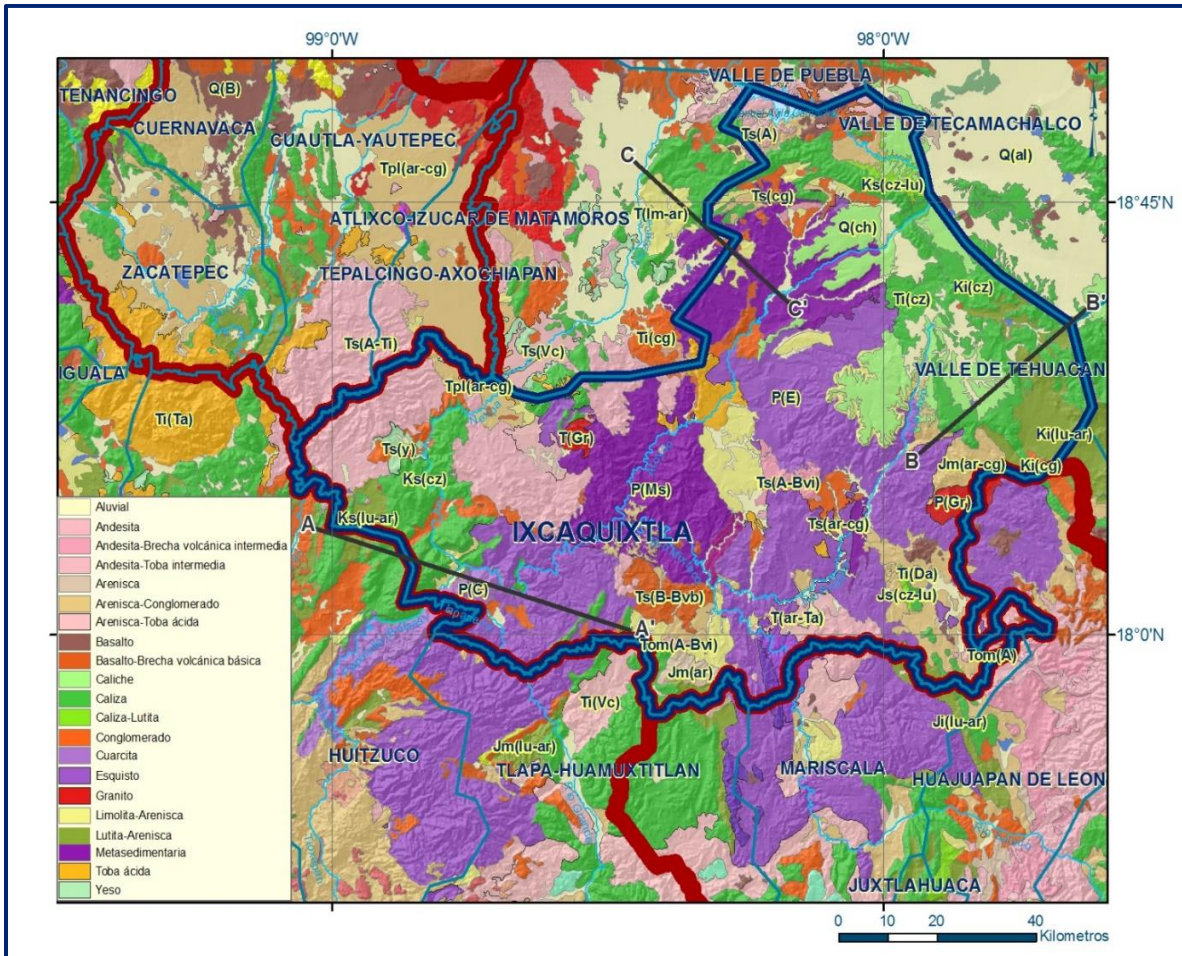


Figura 2. Geología general del acuífero

Las formaciones representan una secuencia constituida por migmatita, esquisto pelítico, cuarcita, anfibolita, eclogita, roca verde, metagabro, serpentinita, metagrauvaca, meta-arcosa y metaconglomerado, cuya litología premetamórfica corresponde a depósitos típicos de arco insular y cuenca oceánica marginal. Las rocas intrusivas afectaron a los sedimentos durante su evolución quedando en parte también metamorfoseadas.

Formación Los Arcos (Olinalá)

Fue definida formalmente por Flores de Dios y Buitrón (1982) al referirse a una sucesión sedimentaria continua, en cuya base se encuentra un conglomerado polimíctico que cambia transicionalmente a limolita, intercalada con areniscas. Sobreyacen a estos depósitos rocas carbonatadas que a su vez cambian transicionalmente a rocas clásticas finas, limitadas por el Complejo Acatlán en la base. Casi al mismo tiempo, Corona-Esquivel (1983), estudia esta misma unidad formacional y la denomina Formación

Los Arcos, para definir una secuencia de rocas sedimentarias marinas y litorales, que contienen *stacheoceras* y *agathiceras* con un alcance estratigráfico Pensilvánico-Pérmico Medio. Su localidad tipo se encuentra en la cañada Los Arcos ubicada a 2.5 km al sureste de Olinalá, Guerrero (Corona-Esquivel, 1981). La litología de dicha formación comprende un paquete de más de 600 m de espesor, que se depositó en un ambiente semejante al de una bahía, con sedimentación desde continental deltaica hasta de plataforma y arrecifal, con preservación de una fauna abundante y muy variada (Corona-Esquivel, 1983). Por sus características litológicas y paleontológicas, se infiere que esta unidad se depositó en ambientes marinos poco profundos, cercanos a la costa, con aporte constante de terrígenos que representa una facies de relleno de cuenca, de tipo flysch pelítico-arenoso.

MESOZOICO

SISTEMA JURÁSICO

Conglomerado Cualác

Formación descrita por Guzmán (1950) con el nombre de Cuarcita de Cualac. Posteriormente, Erben (1956) la designó Conglomerado Cualác. Su localidad tipo se localiza en las cercanías del poblado Cualác, estado de Guerrero, en donde aflora de manera excelente. Esta unidad tiene un espesor máximo de 500 m y está constituida por un conglomerado de matriz cuarcítica, compuesto principalmente de guijarros de cuarzo blanco lechoso, en la base, y en menor cantidad está representada por guijarros de mica-esquistos, gneis e ignimbrita; en algunos niveles se intercalan estratos delgados de limolita y arenisca de grano fino.

Esta formación carece de fósiles, por lo que su edad Jurásico Medio (Aleniense) se le ha designado de acuerdo a su posición estratigráfica bajo las capas con amonitas del grupo Tecocoyunca que la sobreyacen transicionalmente. Su potente espesor sólo podría explicarse relacionándolo con la acumulación de los sedimentos en una cuenca en hundimiento durante largo tiempo, en la cual descargaban ríos torrenciales que transportaban gran cantidad de guijarros. Pero además, las escasas interdigitaciones de arenas o sedimentos más finos, sugieren la presencia de corrientes marinas u oleaje de alta energía que impidieron el depósito de tales sedimentos finos.

Grupo Tecocoyunca.

Burckhardt (1927), describió por vez primera los estratos del Jurásico Medio en los alrededores de Tecocoyunca, pero Jenny (1933) distingue posteriormente dos unidades: superior e inferior.

Más tarde Guzmán (1950) las nombra “Capas Tecocoyunca” y también las separa en inferior y superior. Finalmente, Erben (1956), las eleva de rango denominándolas como las conocemos en la actualidad, dividiéndolo en 5 formaciones: Zorrillo, Taberna, Simón, Otatera y Yucuñuti; propone como localidad tipo a la barranca Tecocoyunca, localizada entre los poblados de Cualác y Huamuxtitlán, Guerrero. El Grupo Tecocoyunca tiene un espesor de más de 250 m y se constituye de una secuencia de estratos que en su porción inferior es de origen continental, mientras que en la parte media presenta intercalaciones marinas; su porción superior está conformada por estratos completamente marinos. Litológicamente se trata de areniscas, limolitas y lutitas que presentan concreciones calcáreo-hematíticas; en algunos niveles existen mantos de carbón y en otros horizontes coquinas. La porción superior de este grupo en el área de Olinalá está constituida por lutitas de color morado y frecuentes intercalaciones de yeso (Corona-Esquivel 1981, Consejo de Recursos Minerales y ECRT-UAG 1997). En el Jurásico Medio se repitieron las condiciones de cuenca somera, permitiendo el depósito del Conglomerado Cualác y del Grupo Tecocoyunca. Su edad se ha ubicado en el Jurásico Medio, por su contenido fósil de flora y fauna (Erben 1956).

Formación Tecomazúchil

La Formación Tecomazúchil del Jurásico Medio, aflora en la región de Ayuquila en el límite de los estados de Oaxaca y Puebla. Es una secuencia continental de conglomerados y areniscas con intercalaciones de tobas andesíticas, que contienen fósiles de plantas que se conservaron como impresiones y compresiones en una secuencia de litarenitas de grano fino de ambiente fluvial. La presencia de esta nueva especie en estratos del Jurásico Medio de la región de Ayuquila, incrementa el escaso registro de estructuras microesporangiadas en la flora jurásica de México.

SISTEMA CRETÁCICO

Formación Zicapa

Consiste principalmente en conglomerados, areniscas y limonitas de color rojo formadas en un ambiente continental, con algunos lentes de caliza intercalados y con un espesor total mayor a los 1,000 m (Guzmán 1950; De Cserna *et al.* 1980; Salinas-Prieto 1986; Consejo de Recursos Minerales y ERCT-UAG 1998a). Guzmán (1950) y Erben (1956) mencionan por primera vez la presencia de los estratos de lechos rojos y tobas intercaladas en esta área. Posteriormente, De Cserna *et al.* (1980) describe formalmente a la Formación Zicapa y ubica su localidad tipo “a unos 5 km al suroeste del poblado de Zicapa, Guerrero”.

Esta unidad aflora principalmente en una faja de ancho variable (~20 km) alrededor y sobre los afloramientos del Complejo Acatlán, el ancho de esta faja es mayor en la porción sur del área. Estas capas rojas consisten de estratos delgados de limolitas, areniscas y conglomerados polimícticos bien consolidados, con fragmentos abundantes de cuarcita, filita, metareniscas, meta-andesitas y clastos de rocas volcánicas. La estratificación gradada es un rasgo común en las areniscas y en los conglomerados. La mayor parte de las areniscas contiene limo o arcilla como cementante.

Formación Morelos

Nombre propuesto por Fries (1960) para referirse a una secuencia de calizas de plataforma; consiste de calizas (wackestone y packestone) de plataforma y arrecifales masivas de edad Albiano- Cenomaniano y una secuencia de anhidritas en su base (Fries 1960; De Cserna *et al.* 1980) que tiene una relevancia mayor en la interpretación de las zonas de despegue dúctil existentes en la zona central de la plataforma.

En las calizas no se han encontrado evidencias claras de vulcanismo contemporáneo y esto ha sido utilizado para separar esta unidad de las secuencias vulcano-sedimentarias que afloran hacia el occidente. Sin embargo, en la zona de Chiautla, Puebla se ha reportado la presencia de lavas de composición básica intercaladas con la secuencia de calizas (Sabanero-Sosa *et al.* 1996), y dentro de la secuencia de calizas se ha observado un estrato vulcanoclástico distintivo (Hernández-Romano *et al.* 1997). En general, se observa que las facies de la Formación Morelos son más someras hacia el este (Hernández-Romano *et al.* 1997) y las facies costeras y arrecifales sobreyacen en algunas zonas a las rocas del Complejo Acatlán o al conglomerado Cualac (De Cserna *et al.* 1980). Más al oriente, en la zona de Tlapa-Tlaltepéj, la secuencia de calizas someras se encuentra intercalada con secuencias potentes de yesos. Por otro lado, la secuencia cercana al Complejo

Acatlán presenta variaciones importantes en su espesor, en la zona de Citlalli y en la zona al noroeste de Papalutla, el espesor de la secuencia de calizas alcanza más de 700 m, mientras que en la zona ubicada entre San Juan de Las Joyas y Papalutla es menor a 100 m. Al oriente y sobre el Complejo Acatlán, el espesor de las calizas disminuye considerablemente o se encuentran ausentes. De esta manera se puede especular que el nivel del mar cubrió sólo parcialmente los afloramientos del Complejo Acatlán durante el intervalo de tiempo durante el cual se depositó la formación.

De acuerdo con su contenido faunístico, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Se correlaciona en edad con las formaciones Cipiapa y Orizaba de la porción central de Puebla, con la caliza El Doctor de Querétaro oriental, en el Estado de San Luis Potosí con las formaciones El Abra y Tamaulipas Superior (en la Sierra Madre Oriental).

Formación Mexcala

Esta unidad se ha definido como una secuencia de ambiente marino compuesta principalmente de areniscas, limolitas y lutitas calcáreas con intercalaciones de conglomerados y estratos de caliza, cuya edad varía desde el Turoniano hasta el Maestrichtiano Inferior y tienen un espesor de más de 1200 m (Fries 1960; Hernández-Romano *et al.* 1997; Long y Friedrich 1998; Parrillita *et al.* 2000; Mondo *et al.* 2000). Las rocas de esta unidad afloran entre la cabalgadura de Teloloapan hacia el oeste y el Complejo Acatlán hacia el oriente, aunque rocas de edad y litología similar se han descrito en la cobertura del Terreno Guerrero y en la zona de Tehuacán.

Las edades reportadas de la Formación Mexcala varían del Albiano Tardío en la zona de Teloloapan (Mondo *et al.* 2000), pasando por el Turoniano en la parte central de la plataforma (secciones de Barranca del Tigre, Axaxacoalco; Hernández-Romano 1997), Coniaciano en la zona de Atenango del Río (Lang y Frierich 1998) hasta el Maestrichtiano Inferior en la zona de Temalac (Perrilliat *et al.* 2000).

En la zona de Atenango del Río–Temalac incluye margas de color café claro, con algunos estratos de areniscas calcáreas de grano fino, de alrededor de 30 a 50 cm de espesor. La litología cambia gradualmente a arena hacia la cima de la sección. En el área de Temalac y Mitepec, la secuencia cambia progresivamente a un ambiente deltaico continental, e incluso se ha reportado la presencia de huellas de dinosaurio (Villafranca *et al.* 1995 en Perrilliat *et al.* 2000). Las formaciones Tetelcingo del Maestrichtiano Superior–Paleoceno y Balsas del Terciario Inferior sobreyacen a la Formación Mexcala. En la mayoría de los casos este contacto es discordante. Sin embargo, en la parte más oriental del área de estudio, entre las localidades de Temalac y Mitepec, los depósitos cambian gradualmente a depósitos continentales. De acuerdo con varios autores (Fries 1960; Ontiveros-Tarango 1973; Lang *et al.* 1996; Lang y Frerichs 1998; Hernández-Romano 1999; Cabral-Cano *et al.* 2000b) el inicio de la deposición clástica marina en una cuenca de tipo antifosa “*foreland*” con cambios abruptos de facies de la Formación Mexcala se puede interpretar como una unidad sin-tectónica relacionada a los primeros pulsos del acortamiento laramídico.

La presencia de clastos de cuarcita ha sido utilizada como evidencia del levantamiento de la parte oriental de la plataforma (Hernández-Romano 1999). Se correlaciona con la porción superior de la Formación Escamela Superior de la porción centro-oriental del Estado de Puebla; en la porción oriental de Querétaro y centro occidental de Hidalgo, se correlaciona con la Lutita Méndez; al sureste de San Luis Potosí con la Formación San Felipe.

CENOZOICO

Grupo Balsas

Nombre asignado por Fries (1960) para referirse a una secuencia continental constituida principalmente por conglomerados, calizas lacustres, arcosas, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas que se presentan en la cuenca del Río Balsas. Más tarde Ortega (*op. cit.*) separa del grupo a una unidad vulcanoclástica constituida por tobas, brechas volcánicas y lavas, que aflora en el área de San Juan Tetelcingo. En el área está constituido por un conglomerado polimíctico que incluye clastos de caliza, arenisca, rocas metamórficas, rocas volcánicas y cuarzo, incluidos en una matriz limo-arenosa de color rojo. Aflora generalmente en bajos topográficos formando amplios valles en las faldas de las sierras. Aunque puede dividirse en varios miembros o formaciones, en la zona se presentan dos miembros distintivos: el inferior es conglomerático y compacto; mientras que el superior es de carácter limo-arcilloso, semicompacto y suave. Representa una sedimentación molasse postorogénica. Los materiales finos se presentan en estratos delgados en tanto que los conglomerados se disponen en capas gruesas y bancos masivos. Campa (*op. cit.*) reporta que dada su naturaleza de relleno de valles-fosa, en algunos lugares se ha calculado un espesor de 500 m.

De acuerdo con las relaciones estratigráficas, Fries (*op. cit.*) establece una edad Eoceno Tardío-Oligoceno Medio; sin embargo, Ortega (*op. cit.*), con base en datación radiométrica obtenida en rocas de la Formación Tetelcingo, sugiere que se amplíe el alcance a Paleoceno-Oligoceno. No se han encontrado fósiles en estas capas rojas; sin embargo, su edad se establece con base en su correlación con el Conglomerado Rojo de Guanajuato, en donde se fecharon los restos de un roedor del Eoceno Tardío-Oligoceno (Edwards, 1965 y Fries, *et. al* 1955). Se correlaciona con el Conglomerado El Morro que aflora en el área de Zimapán y con el Conglomerado Guanajuato que aflora en la porción central del país, así como con las Formaciones Huajuapán, Yanhuitlán y Cuicatlán de Oaxaca.

Rocas Ígneas Intrusivas

Unidad formada por cuerpos de rocas graníticas y pórfidos riolíticos y andesíticos que representan la actividad magmática que se manifestó durante el Terciario Inferior, relacionada a la Sierra Madre del Sur. Se encuentran distribuidos de manera aislada en los extremos occidental y oriental, generalmente asociados con zonas de mineralización, en algunos distritos mineros.

En el subsuelo se considera que constituyen cuerpos de dimensiones batolíticas. De acuerdo al SGM (2000), la edad del emplazamiento de estos cuerpos es de 30 Ma (Eoceno-Oligoceno).

Rocas Volcánicas del Eoceno-Oligoceno

Estas rocas se distribuyen en el área de manera aislada, manifestando la continuidad de la actividad volcánica. El vulcanismo continúa siendo de tipo andesítico, en forma de derrames y brechas con algunos niveles dacíticos, la secuencia se encuentra cubriendo de forma discordante a la unidad basal de andesitas y simultáneamente se encuentran sobreyacidas por cuerpos tabulares de dacitas y riolitas; hacia su cima varía a ignimbritas y riolitas. La edad reportada para esta secuencia volcánica es del Oligoceno-Mioceno (SGM, *op. cit.*).

Formación Huajuapán

Está constituida por derrames de andesita e intercalaciones de toba andesítica y ocasionalmente andesita basáltica, cuya edad se asigna al Oligoceno.

Riolita Tilzapotla

Con este nombre Fries (*op. cit.*) se refirió a una secuencia de brechas riolíticas que afloran ampliamente en las cercanías de Tilzapotla, al sur del Lago Tequesquitengo y del Río Amacuzac, en el Estado de Morelos. Su composición varía de riolita a riolodacita. Presenta características que varían de un lugar a otro, pero en todos ellos su carácter es masivo. En otras localidades se presenta en forma de lavas y tobas de composición dacítica y riolodacítica. Su espesor total es variable, pero en su localidad tipo es del orden de 250 m. Descansa sobre el Grupo Balsas en contacto aparentemente paralelo, aunque puede ser discordante. También descansa, en discordancia, sobre formaciones más antiguas (Morelos, Cuautla y Mexcala). A su vez está cubierta en discordancia, por materiales cuaternarios (aluvión y conglomerados). Con base en edades radiométricas Fries (*op.cit.*) le asignó una edad de Oligoceno Tardío.

Se correlaciona con la serie volcánica Xochitepec de la Cuenca de México, así como con el Grupo Pachuca y con las rocas volcánicas Las Espinas del Estado de Hidalgo.

Formación Cuayuca

Está conformada por varias secciones de yeso con espesores evaporíticos potentes en la carretera federal 140 México-Oaxaca, que fueron identificados por De Cserna (1970), los cuales no habían sido considerados por Fries (1966) en los estratotipos de dicha formación en el área de Cuayuca, Morelos. La Formación Cuayuca se caracteriza por depósitos lacustres continentales sedimentarios. Se divide en tres miembros, que incluyen siliciclástica (conglomerado de limolitas), carbonatos (caliza, cuarzo, margas) y litofacies de sulfato de calcio (yeso). Se le asignó una edad en Mioceno-Plioceno, con base en la debilidad de las relaciones con otras unidades estratigráficas. Sin embargo, la falta de microfósiles y la datación radiométrica en ese momento hacía difícil determinar su edad exacta. Ramírez-Arriaga y Martínez-Hernández (2003) propusieron una edad de Eoceno-Oligoceno Temprano con base en los primeros resultados palinológicos y su correlación con otros conjuntos terciarios.

CUATERNARIO

Formación Cuernavaca

Representa los depósitos de lahares provenientes de la actividad del Campo Volcánico de Zempoala Yace en discordancia erosional marcada encima de todas las otras unidades litológicas de la región. Tiene relaciones angulares notables con el Grupo Balsas y con unidades más antiguas.

Se observa que las unidades volcánicas forman altos topográficos y están fuertemente erosionados; esto sugiere que fueron elevadas e inclinadas a lo largo de fallas que formaron las depresiones sobre las que se acumuló la Formación Cuernavaca. Se depositó principalmente en forma de abanicos aluviales por medio de corrientes de agua originadas en terrenos elevados, donde existían grandes cantidades de detritos volcánicos relativamente poco consolidados y muy susceptibles a la erosión por las lluvias torrenciales.

Se ha cartografiado al sur Iguala, en las cercanías de Chilpancingo, principalmente entre el kilómetro 269 y el 286 de la carretera México- Acapulco; De Cserna encontró depósitos clásticos de grano fino. Se identificaron gasterópodos fósiles del género *Planorbis* en interestratos margosos junto con ostrácodos del género *Cypris*, ambos de edad Mioceno-Pleistoceno.

Basalto

Corresponde a derrames de composición basáltica del Pleistoceno asociados principalmente a zonas de debilidad (fallas) y en algunos casos a eventos explosivos que dieron origen a productos piroclásticos; afloran principalmente en las zonas centro, este y sur del acuífero

Depósitos Recientes

Está representado por depósitos de travertino que se precipitan alrededor de manantiales, depósitos de talud y aluvión. Los depósitos de aluvión están restringidos a los cauces de los arroyos y los valles; varían en tamaño desde arcillas, limos, arenas hasta gravas y boleos. Su espesor máximo es de 10 m y presentan en general permeabilidad media a alta.

4.2. Geología estructural

La deformación en el basamento del Terreno Mixteco (Complejo Acatlán) está evidenciada al menos por tres fases de deformación dúctil, sin embargo, en la cubierta sólo se presenta una de ellas.

Las rocas de la cubierta Paleozoica y Mesozoica presentan evidencias de deformación compresiva, con pliegues amplios orientados norte-sur. Existen también cabalgaduras importantes como la de Papalutla. Los desplazamientos laterales orientados NW-SE juegan un papel importante en el desarrollo de pliegues y cabalgaduras y son paralelas a las estructuras mineralizadas de los distritos de Taxco, Tetipac, Zacualpan y Sultepec.

La fosa que se extiende desde Cuautla, Axochiapan, Izúcar de Matamoros hasta Atlixco, corresponde a una estructura circular tipo caldera posiblemente asociada al Volcán Popocatepetl. El Terreno Mixteco se caracteriza por contar con basamento metamórfico paleozoico, con una cubierta sedimentaria de rocas carbonatadas y sedimentos 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 (Campa y Coney, 1983).

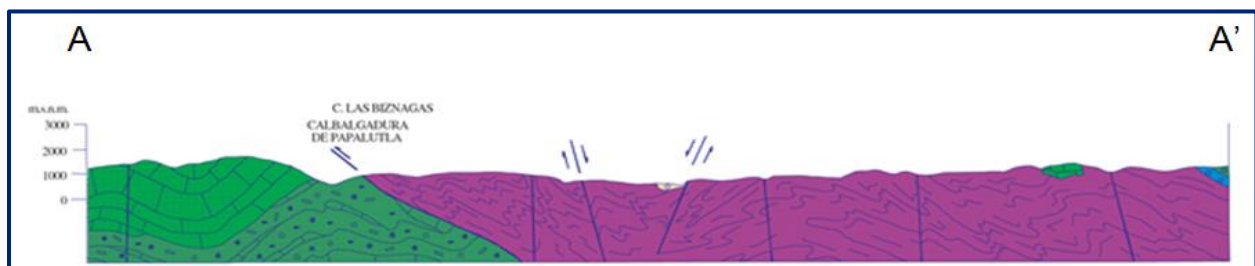
Las estructuras de la cubierta sedimentaria del Terreno Mixteco presentan orientaciones y estilos de deformación distintos, caracterizados por pliegues abiertos con rumbos axiales N-NW, desarrollados en secuencias de areniscas y calizas.

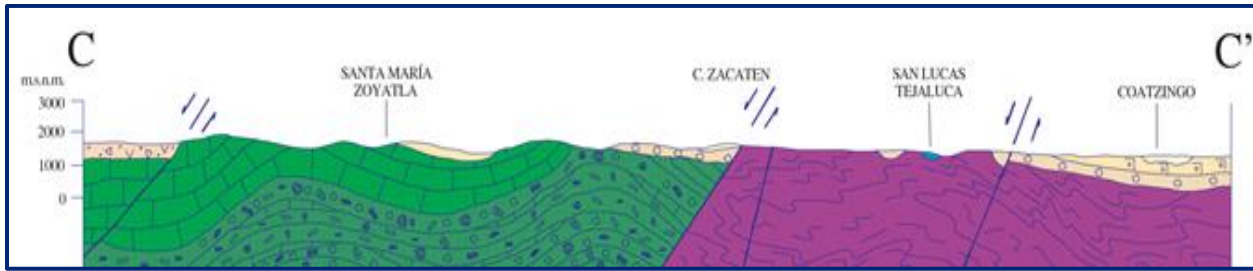
Otros lineamientos de rumbos similares se observan en la distribución linear de los cuerpos y productos volcánicos terciarios, los cuales fueron aparentemente emplazados a lo largo de las fallas normales y fracturas formadas en un tiempo posterior a la formación de las mismas, rasgos que reflejan la presencia de planos de debilidad paralelos al sistema de fallamiento y fracturamiento en el área. Se ha considerado que el bloque Acatlán-Oaxaca, formado en la región donde afloran ambos complejos y su cobertura, han actuado como un bloque rígido durante las deformaciones posteriores a su yuxtaposición; esta afirmación se basa en que existe una concentración de la deformación en sus límites (Nieto-Samaniego *et al.*, 2006, Cerca *et al.*, 2007).

4.3. Geología del subsuelo

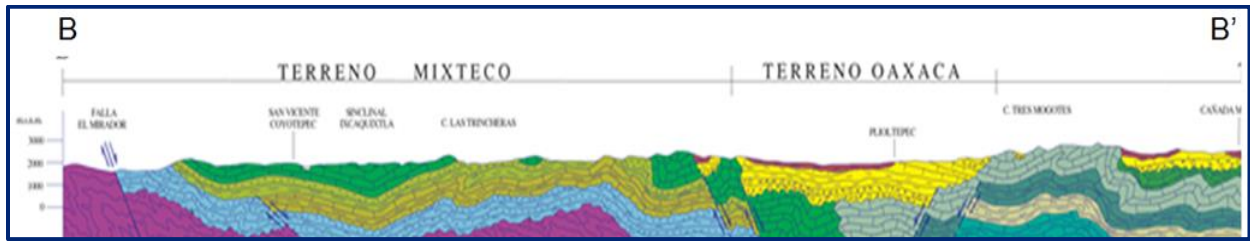
De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que se encuentran restringidos a los cauces de los arroyos y valles intermontanos, así como en las areniscas y conglomerados polimícticos, cuyo espesor es de algunas centenas de metros en el centro de los valles. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, representadas por las calizas y areniscas de las formaciones Morelos y Mexcala, respectivamente, así como rocas volcánicas, con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución el caso de las calizas. Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas, al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y por rocas ígneas intrusivas y metamórficas (figura 3).





Fuente: Carta Geológico-Minera "Cuernavaca" E14-5. Escala 1:250,000. (SGM, 1998)



Fuente: Carta Geológico-Minera "Orizaba" E14-6. Escala 1:250,000. (SGM, 2001)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas y conglomerados polimícticos, cuyo espesor es de algunas centenas de metros en el centro de los valles.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente calizas y areniscas de las formaciones Morelos y Mexcala, respectivamente, y rocas volcánicas; todas ellas con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas.

Estas rocas cretácicas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

No se han realizado pruebas de bombeo en los aprovechamientos ubicados en el acuífero; sin embargo, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Tlapa-Huamuxtlán y Valle de Tehuacán, es posible adoptar los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo y adaptarlos al espesor saturado de cada zona.

De esta manera, las unidades permeables en el acuífero (depósitos aluviales, fluviales y de talud) poseen una transmisividad que varía de **1.0 a $25.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , mientras que en las unidades semipermeables (conglomerados, areniscas y rocas volcánicas), la transmisividad varía de **1.8 a $4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** . La conductividad hidráulica varía de **1.6×10^{-6} a $5.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (0.14 a 0.43 m/d)**.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información piezométrica recabada en 2011, dispersa en 16 pequeñas zonas de explotación distribuidas en la vasta superficie montañosa de la región.

5.4. Comportamiento hidráulico

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático. Además de la extensión superficial y las condiciones orográficas del acuífero, existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae el agua subterránea de los niveles freáticos someros.

Debido a que la gran mayoría de los aprovechamientos subterráneos existentes en el área que cubre el acuífero son norias, que se encuentran dispersas en pequeños valles intermontanos, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En el estudio realizado en el 2011 no se consideró la toma de muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Por correlación hidrogeológica con el acuífero vecino Tlapa-Huamuxtílán, se puede establecer que, de manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano. De igual manera, se puede esperar que el agua bicarbonatada-cálcica sea la familia dominante debido a la presencia de rocas calcáreas y volcánicas, a través de las cuales circula el agua subterránea.

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 2011, se registró la existencia de 963 aprovechamientos, de los cuales 653 son norias, 299 pozos, 4 manantiales y 7 tajos. Del total de obras, 881 están activos y 82 inactivos. De los aprovechamientos activos 489 se destinan al uso agrícola, 277 para uso público-urbano, 73 para uso doméstico, 21 para uso pecuario, 20 para servicios y 1 para uso industrial.

El volumen estimado de extracción por bombeo asciende a **109.0 hm³/año**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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 de un acuífero:

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

7.1. Entradas

Las entradas al acuífero están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv).

Como se mencionó anteriormente, aunque existe una gran cantidad de aprovechamientos, la mayoría de ellos son norias de bajo caudal de extracción, que se encuentran dispersos en la porción sur y oriental del acuífero. Además, debido a la extensión superficial y a las condiciones orográficas del acuífero, existen pequeños valles intermontanos y se identificaron 16 pequeñas áreas de explotación esparcidas en toda la superficie del acuífero.

Por todas estas razones, se optó por plantear un balance hidrometeorológico en la superficie total del acuífero que es de **9,559 km²** para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

Donde:

V_{LL} = Volumen de lluvia;

V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;

V_{ESC} = Volumen escurrido;

V_{INF} = Volumen infiltrado.

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área de balance (9,559 km²) por la lámina de precipitación media anual (785 mm):

$$V_{LL} = 9559 \text{ km}^2 (0.785\text{m}) = \mathbf{7503.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 785 mm y temperatura de 24.0 °C. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

COUTAGNE	ETR = P - χP^2		
Donde:		P (m) =	0.785
ETR= Evapotranspiración m/año		t (°C) =	24.0
P = precipitación en m/año		ETR (m/año) =	0.6369
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$			
t = temperatura en °C			

La fórmula solo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre $1/8X$ y $1/2X$, estando ETR y P en metros, y T en °C. Si P es menor que $1/8X$ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que $1/2X$ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por $ETR = 0.20 + 0.035 T$.

Aplicando la fórmula de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de **636.9 mm** anuales.

El volumen evapotranspirado está dado por el producto del área y la lámina de evapotranspiración, por lo que el volumen de descarga por efecto de la evapotranspiración es de:

$$V_{ETR} = 9559 \text{ km}^2 (0.6369\text{m}) = \mathbf{6087.8 \text{ hm}^3/\text{año.}}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002.

En esta que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

$$\begin{array}{ccccccc} \mathbf{VOLUMEN\ ANUAL\ DE} & & \mathbf{PRECIPITACION} & & \mathbf{AREA\ DE\ LA} & & \mathbf{COEFICIENTE\ DE} \\ \mathbf{ESCURRIMIENTO} & = & \mathbf{ANUAL\ DE\ LA} & & \mathbf{CUENCA} & & \mathbf{ESCURRIMIENTO} \\ \mathbf{NATURAL\ DE\ LA} & & \mathbf{CUENCA} & * & & * & \\ \mathbf{CUENCA} & & & & & & \end{array}$$

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

En el caso en que en la cuenca de estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado. Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (C_e), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15,

$$Ce = K (P-250) / 2000;$$

Si K es mayor que 0.15,

$$Ce = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5;$$

Donde:

P= Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cobertura del suelo.

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1,000,000 para el tipo de suelo, predominan los tipos Regosol, Feozem, Vertisol y Rendzina (figura 4). En cuanto al uso de suelo (figura 5), de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1,000,000, el 61.7 % de la superficie del acuífero es de selva con una cobertura menor del 25 %, en la que el suelo es tipo C, por lo que $K=0.3$; un 23.5 % está cubierto por área agrícola (principalmente barbecho o suelo desnudo), suelo tipo B, por lo que $K=0.28$; el 7.4 % de la superficie es de pastizal con una cobertura del 50 al 75 %, suelo tipo C, por lo que $K=0.3$, el 7.0 % es bosque con cobertura del 25 al 50 %, suelo tipo C con un valor de $K=0.28$ y 0.2 % cubierto por área urbana, suelo tipo C, con un valor de $K=0.32$.

$$\mathbf{K \text{ ponderado} = 0.3 (0.617) + 0.28 (0.235) + 0.3 (0.074) + 0.28 (0.07) + 0.32 (0.002) = 0.2933}$$

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.2933 valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$\mathbf{Ce = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 = 0.1740}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$\mathbf{V_{ESC} = 0.1740 (7503.8 \text{ hm}^3) = 1305.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

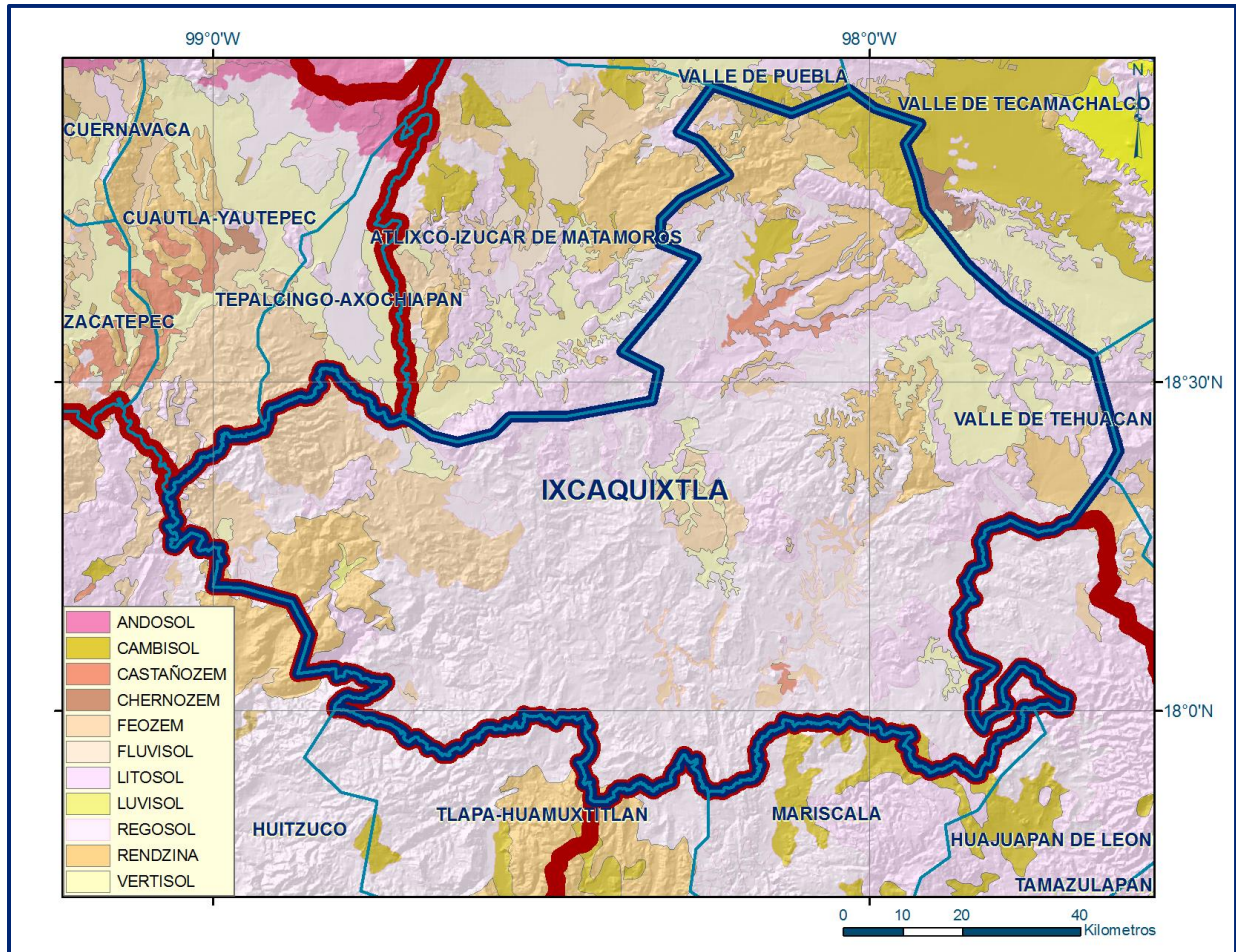


Figura 4. Tipo de suelo

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \\
 V_{INF} &= 7503.8 - 6087.8 - 1305.7 \\
 V_{INF} &= 110.3 \text{ hm}^3/\text{año}
 \end{aligned}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 7503.8 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.015, que es congruente con la topografía abrupta de la región y con la geología superficial dominada por rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas, en general de baja permeabilidad.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 110.3 hm³/año en los 9,559 km² de área de balance del acuífero. Por lo que la **R = 110.3 hm³/año**.

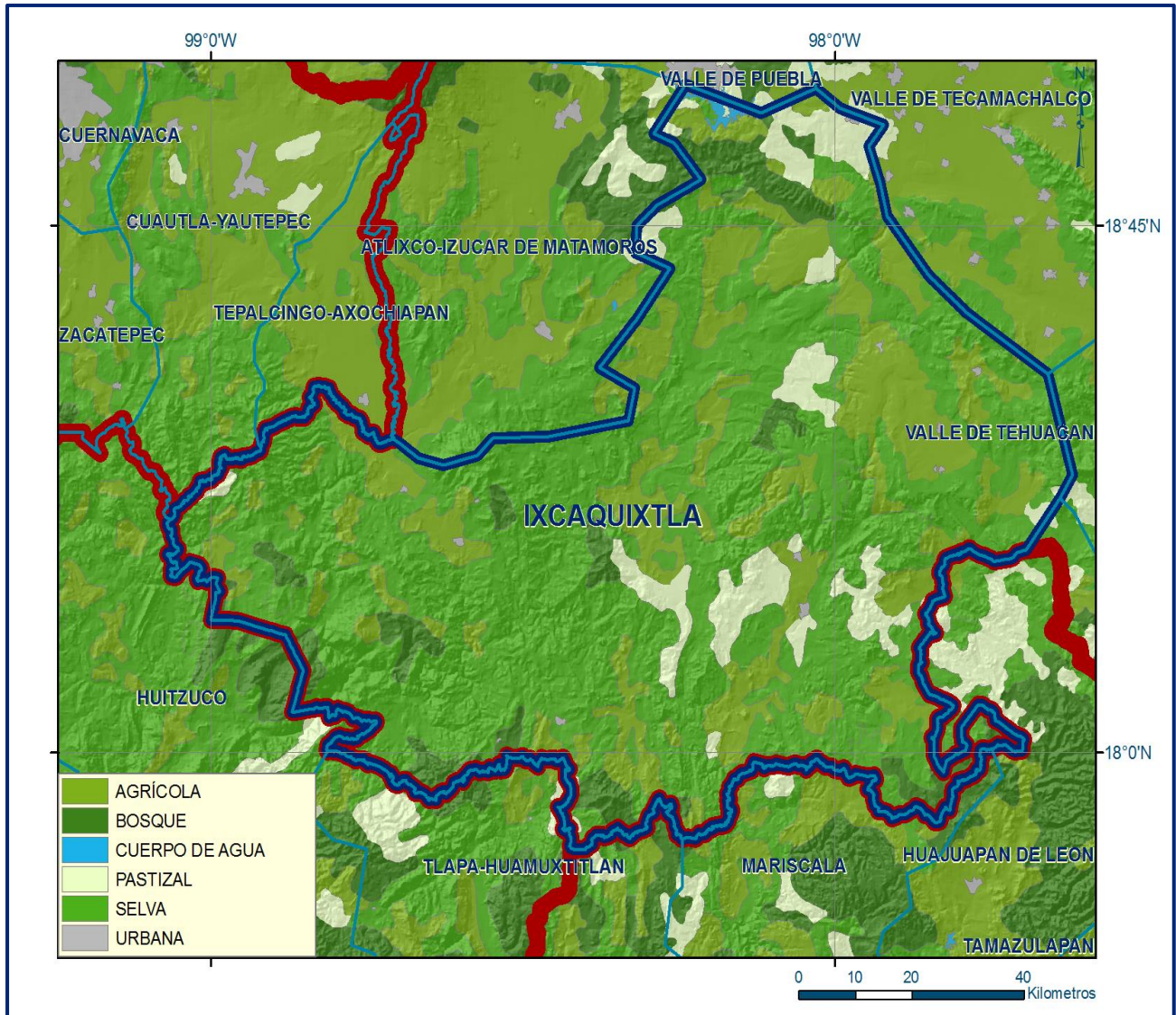


Figura 5. Uso de suelo

7.2. Salidas

Las descargas ocurren principalmente por bombeo (B) y a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de extracción por bombeo es de **109.0 hm³ anuales**.

7.2.2 Descarga a través de manantial (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la existencia de 4 manantiales que en total descargan un caudal aproximado de 42 lps, que equivalen a un volumen de **1.3 hm³ anuales**

7. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **110.3 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que 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, su valor es de **DNC = 1.3 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **74,929,168 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 110.3 - 1.3 - 74.929168 \\ \text{DMA} &= 34.070832 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **34,070,832 m³ anuales**.

8. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad del Acuífero Ixcaquixtla, en el Estado de Puebla. Elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C.