

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL
ACUÍFERO TLAPA-HUAMUXTITLÁN (1201), ESTADO DE
GUERRERO**

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	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía.....	7
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA	9
4.1	Estratigrafía.....	11
4.2	Geología estructural.....	22
4.3	Geología del subsuelo.....	22
5	HIDROGEOLOGÍA.....	23
5.1	Tipo de acuífero	23
5.2	Parámetros hidráulicos.....	23
5.3	Piezometría	24
5.4	Comportamiento hidráulico.....	24
5.4.1	Profundidad del nivel estático.....	24
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	25
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	26
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	26
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	27
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	27
7.1	Entradas.....	27
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	28
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	28
7.1.3	Recarga inducida (Ri).....	30
7.2	Salidas.....	30
7.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	30
7.3.1	Evapotranspiración (ETR)	31
7.3.2	Descarga por manantiales (Dm).....	32
7.3.3	Bombeo (B).....	32
7.4	Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	32
8	DISPONIBILIDAD	33
8.1	Recarga total media anual (R).....	34
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	34
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	34
8.4	Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	35
9	BIBLIOGRAFÍA	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 (REPD).

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 Tlapa-Huamuxtitlán, definido con la clave 1201 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción oriental del Estado de Guerrero, en el límite con el estado de Oaxaca, entre los paralelos 17°00' y 18°00' de latitud norte y los meridianos 98°11' y 98°57' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,759 km² (figura 1).

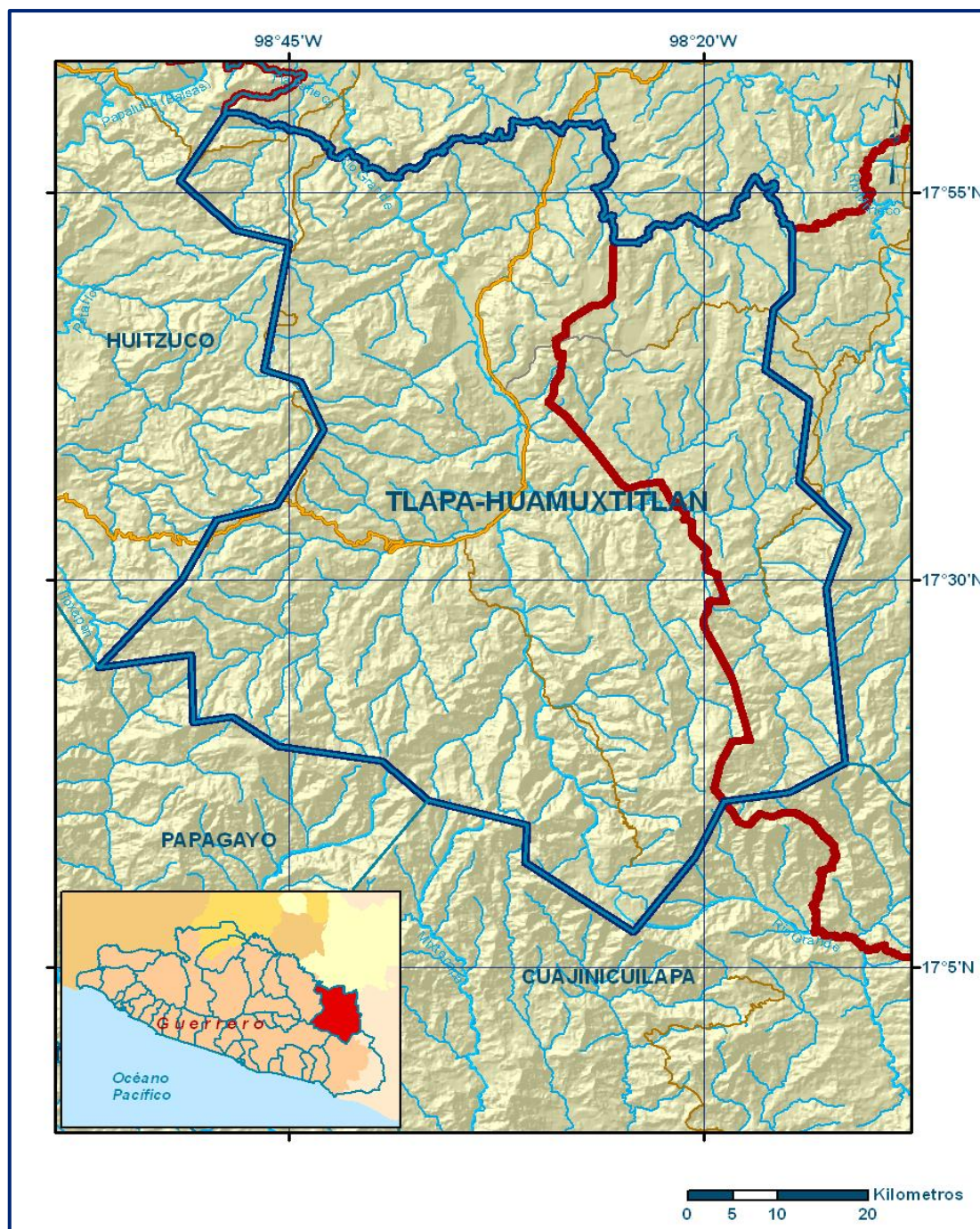


Figura 1. Localización del acuífero

Limita al norte con el acuífero Ixcaquixtla, perteneciente al Estado de Puebla, al este con el acuífero Mariscala, perteneciente al Estado de Oaxaca, al oeste con el acuífero Huitzucó y al sur con los acuíferos Cuajinicuilapa y Papagayo, pertenecientes al Estado de Guerrero.

Geopolíticamente, comprende en su totalidad los municipios de Alpoyeca, Copanatoyac, Huamuxtitlán, Tlalixtaquilla de Maldonado, Tlapa de Comonfort, Xalpatláhuac y Xochihuehuetlán, pertenecientes al Estado de Guerrero, y los municipios Calihual, San Andrés Tepetlapa, San Francisco Tlapancingo, San Juan Bautista Tlachichil, San Juan Ihualtepec, San Mateo Nejapam, San Miguel Ahuhuetitlán y Zapotitlán Lagunas, pertenecientes al Estado de Oaxaca. Parcialmente abarca los municipios Alcozauca de Guerrero, Atlamajalcingo del Monte, Atlixác, Cualác, Malinaltepec, Metlatónoc, Olinalá, Tlacoapa y Zapotitlán Lagunas, pertenecientes al Estado de Guerrero, y los municipios Cocoiyán de Las Flores, San Juan Cieneguilla, San Martín Peras, Santa Cruz de Bravo, Santiago Tamazola y Santiago Yucuyachi, pertenecientes al Estado de Oaxaca.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1201 TLAPA-HUAMUXTITLAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	25	24.5	17	51	51.5	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	98	14	40.1	17	52	35.5	
3	98	14	43.6	17	48	30.2	
4	98	15	48.5	17	47	25.2	
5	98	16	21.0	17	43	33.8	
6	98	13	40.6	17	41	38.0	
7	98	14	17.2	17	36	25.4	
8	98	11	18.5	17	33	16.6	
9	98	12	37.7	17	29	31.2	
10	98	11	28.6	17	18	13.3	
11	98	14	51.4	17	16	16.8	
12	98	18	47.3	17	15	43.0	
13	98	20	31.3	17	12	11.0	
14	98	24	15.9	17	7	16.9	
15	98	30	46.2	17	11	49.2	
16	98	30	37.7	17	14	13.6	
17	98	36	35.9	17	15	46.9	
18	98	39	22.6	17	18	19.9	
19	98	45	42.5	17	19	17.3	
20	98	48	23.7	17	21	12.1	
21	98	50	45.8	17	20	47.5	
22	98	50	52.0	17	25	10.1	
23	98	56	29.6	17	24	20.8	
24	98	51	27.1	17	29	59.9	
25	98	49	21.3	17	33	53.9	
26	98	45	44.8	17	34	51.3	
27	98	42	54.4	17	39	44.2	
28	98	44	17.2	17	42	48.9	
29	98	46	29.3	17	43	33.5	
30	98	45	0.6	17	51	43.6	
32	98	48	15.0	17	52	33.2	
32	98	51	36.6	17	55	45.9	
33	98	48	49.0	18	0	5.9	DEL 33 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	25	24.5	17	51	51.5	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tlapa-Huamuxtitlán pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Guerrero. 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 uso principal del agua es el público-urbano. El acuífero pertenece al consejo de cuenca “Río Balsas”, instalado el 26 de marzo de 1999. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero no se han realizado estudios geohidrológicos, sólo se cuenta con trabajos geológicos de alcance regional e información piezométrica dispersa en tiempo en y espacio. El único estudio hidrogeológico de evaluación es el que se menciona a continuación

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS TLAPA-HUAMUXTITLÁN, POLONCINGO, BUENAVISTA DE CUÉLLAR Y TLACOTEPEC, EN EL ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo S.A DE C.V., para la Comisión Nacional del Agua en 2011.

El objetivo general de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales, sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

ESTRATIGRAFÍA DE LA REGIÓN DE LA MONTAÑA, ESTADO DE GUERRERO, 1993.

Rodolfo Corona Esquivel. En este trabajo está basada la descripción de las unidades litológicas ya que presenta un buen detalle de la estratigrafía de la región.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero Tlapa-Huamuxtitlán se encuentra en la provincia fisiográfica “Sierra Madre del Sur”, subprovincias “Cuenca Río Balsas-Mezcala” y “Río Tlapaneco.”

La “Sierra Madre del Sur”, localizada al sur de México, presenta una estructura compleja y se encuentra constituida por una serie de montañas que se extienden a lo largo de 1,200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca.

Su representación en la región se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la porción meridional, donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm. Está orientada de manera paralela a la costa del Océano Pacífico, separada del Eje Neovolcánico por la Depresión del Balsas. Las subprovincias “Cuencas Río Balsas-Mezcala” y “Río Tlapaneco” están conformadas por profundos y sinuosos valles a lo largo de los cuales los ríos Balsas, Tepalcatepec y Tlapaneco han labrado las sierras, dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta (Raisz, 1964).

En general presenta 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 de climas según Köppen modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes para el acuífero Tlapa-Huamuxtitlán son de tipo semicálido, cálido y templado.

Para la determinación de las variables climatológicas, se cuenta con información de 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Ixcateopan, Huamuxtitlán, Metlatónoc y Xochihuehuetlán, cuyo registro comprende un periodo de 57 años (1953 a 2010). Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de 899.0 mm y 24.3 °C, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero Tlapa-Huamuxtitlan pertenece a la Región Hidrológica No.18 Balsas, cuenca del Río Tlapaneco. Su corriente principal es el Río Tlapaneco (Río Grande), el cual se origina en la unión de dos corrientes: el Coicoyán o Salado que desciende 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 1600 msnm desde la Sierra Malinaltepec en el Estado de Guerrero. El tipo de drenaje que predomina es dendrítico.

Otra corriente importante es el Río Mixteco, el cual tiene sus orígenes en la vertiente occidental de la Sierra de Oaxaca, en la región Mixteca, 25 km al sur-suroeste del poblado Santa María La Asunción Tlaxiaco, Oaxaca, donde se forma con las aportaciones de los ríos Tlaxiaco y Mixtepec y más adelante con las del Río Salado, considerado en esta parte como el colector general.

Aguas abajo de la confluencia del Atoyac y el Mixteco, el Río Balsas recibe por su margen derecha las aguas del Río Nexapa. Este es otro de los formadores primarios del Río Balsas, que nace de los escurrimientos que descienden del Volcán Popocatepetl a una altitud de 5,400 msnm. Nueve kilómetros antes de su confluencia con el Río Balsas, sobre su margen izquierda, recibe las aguas del Río Tlapaneco, uno de los de mayor caudal de la cuenca Alto Balsas.

3.4 Geomorfología

La identificación de los elementos homogéneos de terrenos a partir de sus características litológicas, origen edad, drenaje y geometría, permiten definir las unidades geomorfológicas en términos cartográficos.

Las características morfológicas del terreno son de gran importancia en la determinación de los parámetros que controlan el flujo de las aguas superficiales y subterráneas de una región. 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 mayores de 2,500 msnm se asocian con zonas de cabalgaduras, pliegues anticlinales y emplazamiento de rocas intrusivas y volcánicas; se encuentran orientadas en una dirección NS y NNE-SSW y por lo común se forman en la secuencia de rocas calcáreas, sin embargo es necesario mencionar que la secuencia mesozoica metamorfozada del Terreno Guerrero debido a su carácter alóctono, configura unidades homogéneas de terreno que adquieren elevaciones mayores a 2,500 msnm.

Por otra parte, en las rocas ígneas no se manifiesta continuidad longitudinal, sus relieves se manifiestan de manera local y aislada.

Dentro del contexto geológico regional, las unidades hidrogeológicas del área estudiada, se encuentran comprendidos en los Terrenos Tectonoestratigráficos Guerrero y Mixteco (Campa y Coney, 1983). El relieve que conforman actualmente estos bloques, guardan 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) rejuvenecieron 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 bajos (valles y lomeríos) están localizados en los sinclinales.

El factor litológico también tiene implicaciones directas en 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 influencia dentro de la formación de depresiones, cañadas y barrancas derivados del rompimiento súbito de la continuidad longitudinal de fragmentos homogéneos y su disección lineal.

4 GEOLOGÍA

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 del Estado de Guerrero (figura 2).

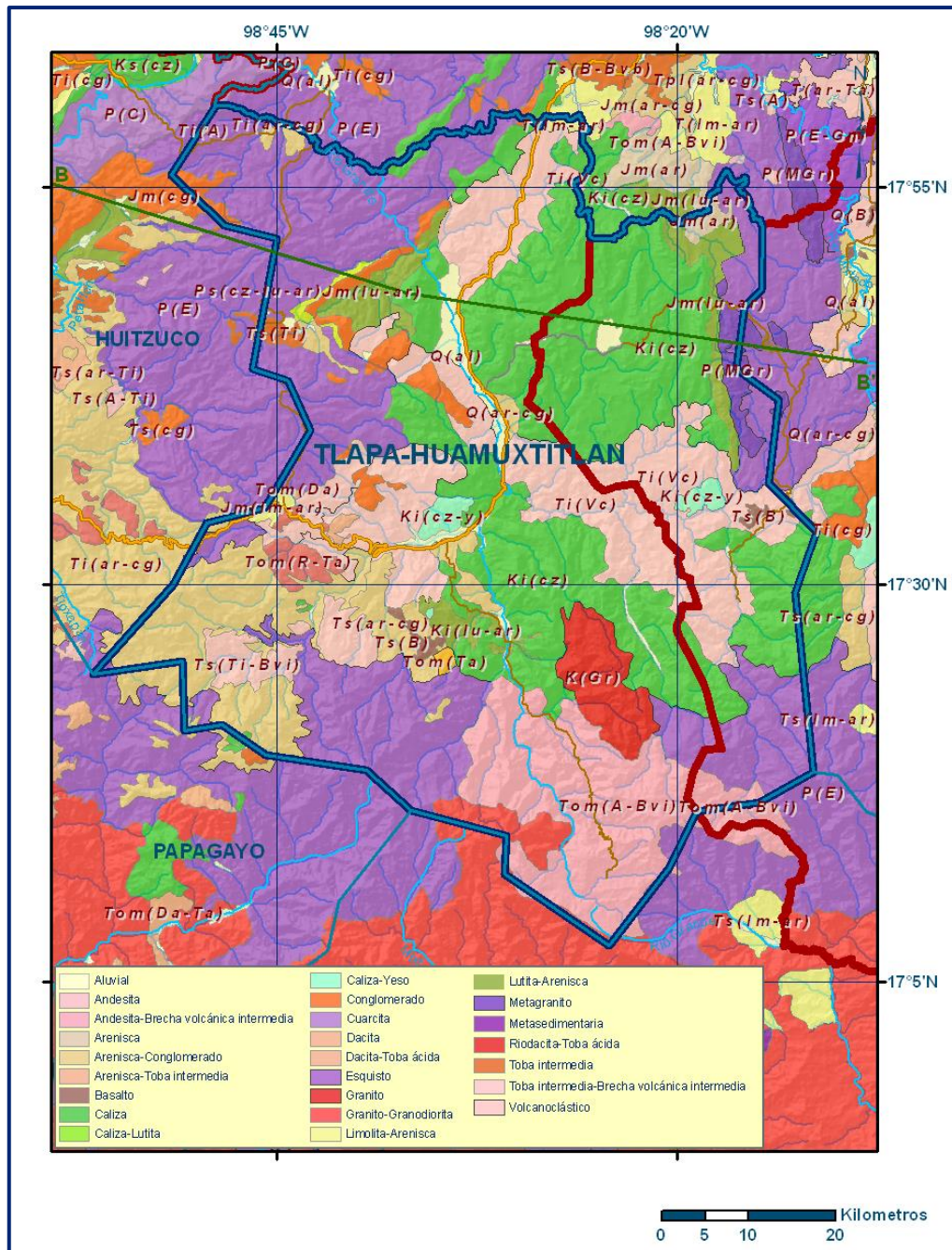


Figura 2. Geología general del acuífero

De acuerdo a división de Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983), el acuífero forma parte del Terreno Guerrero y de la Plataforma Morelos-Guerrero (cubierta del Terreno Mixteco). Las rocas que forman parte de estos terrenos están cubiertas parcialmente e intrusionadas por rocas asociadas al magmatismo de la Sierra Madre del Sur.

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Paleozoico Inferior al Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológicas se presenta a continuación de las más antigua a la más reciente:

ERA PALEOZOICA

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), fue formalmente definida por Ortega-Gutiérrez (1978), quien 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).

Estas 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 metamorfoseados.

Las rocas del Complejo Acatlán de edad Cámbrico-Ordovícico fueron metamorfoseadas por última vez en el Devónico correspondiendo la edad isotópica de 380 ± 6 m.a. a su culminación tectonotérmica (Cserna *et al.*, 1980).

Posteriormente, durante el Mississípico y Pensilvánico, la región se levantó y erosionó exponiendo niveles que según la petrología de sus rocas, se formaron bajo la superficie. Su base no está expuesta en la región de La Montaña, mientras que su cima es cubierta discordantemente por la Formación Los Arcos o unidades más jóvenes.

En el acuífero forma el basamento metamórfico de las subcuencas, en las que subyace de manera discordante a la secuencia terrígena continental del Jurásico Inferior.

Formación Los Arcos (Olinalá)

Definida formalmente por Flores de Dios y Buitrón (1982), para referirse a una sucesión sedimentaria continua, en cuya base se encuentra un conglomerado polimíctico que pasa transicionalmente a limolita, la cual se intercala 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 y la Ignimbrita Las Lluvias en la cima. 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 (Corona-Esquivel, 1981). La litología de dicha formación comprende un paquete de más de 600 m de espesor, las rocas que constituyen esta unidad se formaron en un ambiente semejante al de una bahía, con sedimentación desde continental deltaica hasta de plataforma y arrecife, contienen fauna fósil abundante y muy variada (Corona-Esquivel, 1983). La Formación Olinalá se correlaciona en tiempo con las formaciones Matzitzi e Ixtaltepec de esta misma región; con las formaciones Gruperá, Vainilla y Paso Hondo de la región de Chicomuselo, Chiapas. y con las formaciones del Monte y Guacamaya del Anticlinorio Huizachal-Peregrina, Tampaulipas.

Por sus características litológicas y paleontológicas, se infiere que 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. Flores de Dios y Buitrón (1982, 1986), Corona-Esquivel (1983, 1985) y Juárez-Arriaga (2006) mencionan que esta unidad aflora en el flanco oeste del Sinclinal Olinalá-Huamuxtitlán (Sinclinal La Carbonera), Estado de Guerrero.

ERA MESOZOICA

Sistema Jurásico

Ignimbrita Las Lluvias

El nombre fue propuesto por Corona-Esquivel (1981) para describir una unidad ignimbrítica de composición ácida que cubre en discordancia a la Formación Los Arcos y que está cubierta a su vez discordantemente por el Conglomerado Cualác del Jurásico Medio. Su localidad tipo se ubica en el Arroyo Los Arcos, muy cerca del paraje conocido como "Las Lluvias.

El espesor de la formación varía entre 50 y 80 m y consiste de una roca porfídica de color crema, muy silificada que muestra un bandeamiento bien definido. Al microscopio se determinó como una toba félsica piroconsolidada.

Por su posición estratigráfica se le asignó una edad postpérmica tardía y pre-jurásica media. El hecho de que durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano tuvo lugar el desarrollo, en mayor o menor grado, de vulcanismo félsico continental en México, sugiere una edad triásica para dicha formación.

En el Triásico la Ignimbrita Las Lluvias, marca un período de vulcanismo continental relacionado a una zona de tensión dentro de la corteza continental o de una subducción en un margen lejano.

Conglomerado Cualác

Formación descrita por Guzmán (1950) con el nombre de Cuarcita Cualác. Posteriormente, Erben (1956) la designó Conglomerado Cualác.

Su localidad tipo se localiza en las cercanías del poblado Cualác, Estado de Guerrero, en donde dicha formación aflora de una manera excelente. Esta unidad tiene un espesor máximo de 500 m, está constituida como 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-esquisto, 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 Jurásica Media (Aleniano) 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 sedimentos en una cuenca en hundimiento durante largo tiempo, en la cual descargaban ríos torrenciales que transportaban gran cantidad de guijarros.

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 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 Zorrillo.

Erben (1956) define a la Formación Zorrillo constituida predominantemente por areniscas cuarcíticas de grano fino a medio, de color café grisáceo, de estratificación delgada con intercalaciones de arenisca conglomerática, concreciones limolíticas, restos de plantas, lutitas carbonosas y mantos de carbón; contiene también limolitas con estratificación cruzada dentro de un ambiente de origen continental.

Sobreyace concordantemente sobre el Conglomerado Cualác y subyace concordantemente a la Formación Taberna. El espesor de esta formación varía entre 20 y 80 m y su localidad tipo se sitúa en la Loma del Zorrillo, ubicada al este de San Juan Diquiyú, Oaxaca; se le asigna una Edad de Aleniano-Bathoniano.

Formación Taberna Erben (1956) la describe como lutitas, arcillas oscuras, lutitas calcáreas oscuras, con concreciones fosilíferas calcáreo-hematíticas, areniscas cuarcíticas grises, lutitas calcáreas con concreciones esferoidales y pistas de gusanos, margas y bancos aislados de calizas oscuras que intemperizan a un color amarillento. La localidad tipo la sitúa en el lado sur del Arroyo La Taberna, localizado en las inmediaciones de la Barranca El Carrizo, al noreste de San Juan Diquiyú, Oaxaca.

La formación registra un espesor que varía entre 50-60 m, sobreyace concordantemente a la Formación Zorrillo y subyace de manera transicional y concordantemente a la Formación Simón.

Su depósito indica que se efectuó en un medio ambiente palustre con influencia continental, en donde existía un vulcanismo explosivo tipo arco insular y zonas metamórficas de donde provinieron los clásticos que la constituyen.

Formación Simón.

Este nombre formacional fue utilizado por Erben (1956), para designar una secuencia de areniscas de color amarillento y pardo, de grano medio a grueso, de estratificación mediana a gruesa, areniscas cuarcíticas claras de grano fino, areniscas conglomeráticas, limolitas, lodolitas, lutitas carbonosas y bancos de carbón, así como por bancos de caliza oscura y de coquinas de ostras.

Esta unidad sobreyace de manera concordante y transicional a la Formación Taberna y subyace concordantemente a la Formación Otatera. Designa como localidad tipo, la parte inferior del Arroyo Simón, en la Barranca El Carrizo, al noreste de San Juan Diquiyú, Oaxaca, se le asigna una Edad de Bathoniano y un espesor estimado varía de 80-100 m.

El depósito de esta formación se efectuó en áreas continentales con influencia palustre, cercanas a áreas en donde existía un vulcanismo explosivo.

Formación Otatera.

Erben (1956) la describe como areniscas de grano fino a medio con estratificación delgada y en ocasiones cruzada, areniscas cuarcíticas de grano fino, limolitas y lodolitas de color café claro a beige, lutitas oscuras con concreciones calcáreo-hematíticas, calizas oscuras y limolitas calcáreas.

Esta unidad sobreyace de manera transicional y concordante a la Formación Simón y subyace concordantemente a la Formación Yucuñuti. La localidad tipo se encuentra en la cañada Otatera tributaria del Río Rosario, al norte de El Rosario, Oaxaca. Su depósito ocurrió en un ambiente mixto cercano a la costa, palustre y continental con influencia de áreas volcánicas, su espesor varía de 50-70 m.

Formación Yucuñuti

El nombre fue utilizado por Erben (1956), para designar a una secuencia de coquinas de ostreas, coquinas de pelecípodos pequeños principalmente *Astarte sp.* y coquinas de *Cirithium*, que en algunas ocasiones contienen placas de yeso secundario y concreciones calcáreas de aproximadamente 20 cm de diámetro; calizas de color café, calizas margosas, margas y lutitas oscuras que contienen concreciones esferoidales pequeñas.

Su localidad tipo es el Arroyo Yucuñuti, en las cercanías de Yucuñuti de Juárez, Oaxaca. La edad de esta formación fue establecida a partir del contenido fósil y corresponde al Calloviano.

Su espesor varía de 50-200 m, aunque generalmente oscila entre los 50-90 m. Al Grupo Tecocoyunca se le asigna una edad que abarca del Bajociano al Calloviano de acuerdo con su contenido fósil de flora y fauna (Erben 1956). El estudio de las amonitas de su porción superior sugiere que en esa época existió una comunicación entre los mares del Pacífico y Tethys (Westermann, 1981).

Sistema Cretácico

Grupo Tlaxiaco

El nombre fue propuesto de manera informal por Cartagena-Hernández (1981) para agrupar a las rocas sedimentarias del Cretácico Inferior que afloran ampliamente en las inmediaciones de la ranchería Ojite, en el Estado de Oaxaca.

En la región de La Montaña de Guerrero se considera perteneciente a este grupo al paquete de 250 m que consiste principalmente de conglomerados y areniscas de origen continental distribuidos a lo largo de una franja sinuosa cerca de la margen occidental del Valle de Huamuxtitlán, los cuales sobreyacen discordantemente al Grupo Tecocoyunca y sobreyacen a las capas de caliza de la Formación Teposcolula. Está constituido por las formaciones Ojite, Jaltepetongo y San Isidro.

Formación Ojite

Nombre propuesto por Cartagena-Hernández (1981), para designar una secuencia constituida por conglomerados en estratos gruesos con abundantes fragmentos de cuarzo, capas de areniscas cuarcíferas ligeramente calcáreas, wackestone oolítico y esporádicas intercalaciones de dolomías en estratos gruesos.

Su localidad tipo la sitúa en los afloramientos que se encuentran sobre la carretera a Putla, cerca del Poblado de Ojite, Oaxaca. Su espesor es escaso y varía de 4 a 8 m. Por sus relaciones estratigráficas, sobre la Formación Sabinal de edad Kimmeridgiano-Tithoniano y bajo la Formación Jaltepetongo de edad Hauteriviano, se considera que el depósito de la Formación Ojite se realizó durante el Berriasiano-Valanginiano.

Es correlacionable en tiempo con las formaciones Ixtapan, Acahuizotla y Xochicalco de la región de Iguala, Guerrero y con la Formación Taraises del norte de México. De acuerdo con sus características litológicas y sedimentológicas, se infiere que se depositó en un medio ambiente nerítico a lagunar de alta energía, sobre una superficie irregular del fondo marino y con subsidencia rápida.

Formación Jaltepetongo

Nombre propuesto por González-Alvarado (1970), para designar a una secuencia de lutitas apizarradas y areniscas calcáreas en estratos delgados a laminares (Castro-Rodríguez *et al.*, 2000); posteriormente Cartagena-Hernández (1981) con base en estudios de campo, la sitúa en la parte media del Grupo Tlaxiaco.

Se trata de una alternancia rítmica de mudstone a packstone arcilloso, en estratos delgados a gruesos, que alternan con lutitas calcáreas y conglomerados calcáreos; algunos estratos están dolomitizados, contiene microlaminaciones, exfoliación laminar y en forma de paralelepípedos, estratificación cruzada y micropliegues. Su espesor reportado varía de 96 m en el área del Cañón de Tonalá, a 230 m en las cercanías de Yutatío.

Por su posición estratigráfica sobre la Formación Ojite del Berriasiano-Valanginiano y bajo la Formación San Isidro del Barremiano-Aptiano, se considera que la Formación Jaltepetongo pertenece al Hauteriviano. Se correlaciona en tiempo con la Formación San Juan Raya de Puebla; con la Formación Malpaso de Chiapas, con las formaciones Xonamanca y Chivillas de la Cuenca de Zongolica; con la Formación San Lucas de Michoacán y con la Formación Tamaulipas Inferior de la región norte de México.

La sedimentación rítmica que presenta, así como la presencia de microlaminaciones y micropliegues, indican que se trata de un depósito de aguas someras, de tipo flysch, que recibió aporte de terrígenos.

Formación San Isidro

Nombre Propuesto por López Ticha (1970), para designar una secuencia clástica que aflora en el cauce del Río San Isidro, ubicado al suroeste de Tlaxiaco. Está constituida por una alternancia rítmica de conglomerados con abundantes fragmentos de cuarzo, areniscas conglomeráticas, areniscas y limolitas; los estratos son gruesos a laminares y la coloración en general es rojiza; presenta estratificación cruzada, gradada y laminaciones. Su espesor varía de los 400 a 1,170 m de potencia.

Su edad sólo se puede inferir por su posición estratigráfica debido a la ausencia de fauna; por encontrarse sobre la Formación Jaltepetongo de edad Hauteriviano y debajo de la Formación Teposcolula de edad Aptiano-Cenomaniano, se considera que la Formación San Isidro es de edad Barremiano-Aptiano. Su depósito se realizó en un medio ambiente epicontinental, con invasiones marinas esporádicas, que caracterizan a un depósito tipo “molasse” transgresivo, producto de una fase tectónica post-orogénica.

Yesos Tlaltepéji

El nombre fue propuesto por Salas (1949), para describir las capas de yeso y anhidrita que afloran en la zona limítrofe entre los estados de Puebla, Oaxaca y Guerrero. En la región de La Montaña de Guerrero afloran en el Valle de Huamuxtitlán al norte y al este de Tlapa, en los alrededores de Tlalixtlaquilla y Alcozauca de Guerrero. Esta formación consiste en capas de yeso, anhidrita y lentes delgados de caliza, su espesor expuesto es del orden de 300 m; sin embargo, debe ser mayor ya que no está expuesto su contacto inferior.

En cuanto a su edad, no contiene fósiles ni tampoco dentro de la región de La Montaña están expuestas las relaciones de contacto con la formación inferior; no obstante, con base en el hecho de que por lo general se localiza hacia la base de la caliza Teposcolula, se considera que pertenecen al Cretácico Temprano. Se depósito ocurrió en ambientes lagunares tipo sabkha, en donde se existían fuertes concentraciones de sales de calcio, potasio y magnesio, los cuales bajo climas tropicales favorecieron el depósito de las anhidritas.

Caliza Teposcolula (Formación Morelos)

Esta formación fue nombrada por Salas (1949), según afloramientos próximos al poblado de dicho nombre, situado en la porción noroccidental del Estado de Oaxaca. Cerca de Teposcolula la formación consiste de calizas color crema o gris oscuro, que se vuelve blanca al intemperismo, densa y con algunos horizontes fosilíferos con abundantes ostras pequeñas, partes masivas y otras bien estratificadas.

Al norponiente de Huamuxtitlán en la región de La Montaña, el Río Tlapaneco corta a las calizas exponiendo hacia su base capas de 0.60 a 1.20 m de espesor de caliza gris en parte dolomitizada; la porción superior en esa localidad consiste en capas de 0.40 a 1.0 m de espesor de caliza café claro que por intemperismo se vuelve gris claro; contiene en ocasiones nódulos y vetillas de pedernal blanco y abundantes microfósiles del grupo de foraminíferos, entre otros.

El espesor máximo de esta formación en el área de Huamuxtitlán es de aproximadamente 600 m, descansa discordantemente sobre las capas de areniscas y conglomerados del Grupo Tlaxiaco; su contacto superior está cubierto discordantemente por las rocas vulcanoclásticas del Cenozoico y gran parte de su límite oriental con el valle de Huamuxtitlán es cubierto por aluvión y depósitos de talud. Su edad se determinó con base en los microfósiles que presenta con mucha abundancia en algunas capas, particularmente en la cima, constituidos entre otros por ejemplares de *Nummuloculina heimi* del Cretácico (Albiano-Cenomaniano).

Los primeros depósitos del Cretácico corresponden al Grupo Tlaxiaco cuya litología indica un ambiente infralitoral a continental. Simultáneamente, en una región ubicada más al oriente, se depositaron los yesos y calizas de la Formación Tlaltepéji, indicando el inicio de la transgresión marina del Golfo de México, la que posteriormente, en el Cretácico Medio, culminó inundando la región oriental del área, permitiendo el depósito de la caliza Teposcolula.

A finales del Cretácico y principio del Cenozoico los efectos de la Orogenia Laramie se hacen evidentes en la deformación de las estructuras ya existentes y en el plegamiento de las rocas post-jurásicas

Formación Balsas (Formación Huajuapán)

Fries (1960) propuso el nombre de “Grupo Balsas” para una secuencia de rocas que comprende a varios tipos litológicos locales de espesor variable, expuestos en la cuenca del Río Mezcala-Balsas. Posteriormente, de Cserna (1955) la denominó Formación Balsas por estar más acorde el término “Formación” con el código de nomenclatura estratigráfica.

En el acuífero Tlapa-Huamuxtitlán los sedimentos de esta formación se distribuyen en áreas pequeñas, principalmente en las partes más bajas. Puede observarse en los alrededores de Olinalá, al norte Huamuxtitlán, y en otras localidades. En el área de La Montaña de Guerrero se le conoce también con el nombre de Formación Huajuapán. Barreda (1946) denomina como Formación Cuicatlán a conglomerados de color rojizo que afloran en el poblado de Cuicatlán, Oaxaca. Salas (1949), nombra como Capas Huajuapán a un conglomerado calcáreo bien cementado.

Posteriormente, Erben (1956), la define como Formación Huajuapán, ubicando la localidad tipo en Huajuapán de León, Oaxaca, separándola en tres miembros que de la base a la cima son: Miembro Catarina, que se encuentra formado por conglomerados calcáreos; Miembro Tezoatlán, constituido por limolitas, areniscas y tobas; Miembro Volcánico, que presenta un predominio de rocas volcánicas de composición ácida e intermedia, con esporádicas intercalaciones de limolitas. Su espesor total alcanza los 200 m en el área de estudio.

Con base en la posición estratigráfica que guarda con las rocas que la subyacen y sobreyacen y al evento tectónico que la produjo, se le asigna una Edad Eoceno-Oligoceno Temprano; correlacionable con las formaciones Tamazulapán, Tehuacán, Grupo Balsas y Ahuichila del norte de México. Su depósito se llevó a cabo en un medio ambiente continental, con fuerte actividad ígnea y al mismo tiempo una erosión intensa, causada por un rápido levantamiento producido por la fase paroxismal de la Orogenia Laramide, por lo que se considera un depósito de tipo “molasse” postorogénico. Tanto la litología como el espesor y el grado de compactación varían de un lugar a otro.

En el área de La Montaña se presenta en capas ligeramente inclinadas que cubren en discordancia angular principalmente a los sedimentos de Paleozoico, al Conglomerado Culaác del Jurásico y a la Caliza Teposcolula; a su vez está cubierta discordantemente por capas vulcanoclásticas de la unidad Volcánico Indiferenciado del Cenozoico.

Volcánico Indiferenciado

Esta unidad corresponde a las rocas volcánicas y vulcanoclásticas del Eoceno-Oligoceno, descritas por varios autores bajo el nombre de Terciario Volcánico, sin asignarle un nombre específico, forman parte del vulcanismo que se manifiesta en gran parte del sur de México que se ha relacionado a un arco magmático continental cenozoico cuya ubicación aún no es definida.

La unidad agrupa a capas de espesor medio de origen vulcanoclástico con intercalaciones aisladas de capas de mediano espesor de conglomerados, sus cantos son casi exclusivamente andesitas y tobas andesíticas. Hacia la porción superior consiste en una toba verde muy compacta, coronada por una ignimbrita de color verde claro. También es frecuente observar hacia la parte superior, la presencia de brechas volcánicas muy compactas. Hacia la porción norte de La Montaña, en el área de Cualác y Xochihuehuetlán, es común encontrar diques de composición andesítica intrusionando a esta secuencia de rocas vulcanoclásticas.

Cubre discordantemente a la Formación Balsas y a formaciones más antiguas, a su vez, sólo está cubierta en áreas pequeñas por depósitos clásticos recientes. Su espesor máximo es aproximadamente de 500 m. Después del evento volcánico, fallas normales dislocaron bloques y un fallamiento a rumbo ha desplazado y truncado estructuras. Una de las más relevantes es la falla Huamuxtitlán.

Aluvión y Depósitos de Talud

El aluvión se presenta en algunos pequeños valles y en la márgenes de las corrientes principales, está constituido por arcillas, limo, arena y gravas mal consolidadas. Los depósitos de talud ocurren en casi toda el área y se presentan esencialmente al pie de los escarpes que forman las unidades más resistentes, consisten en bloques y fragmentos de rocas que presentan dos o tres litologías diferentes, dependiendo del lugar donde se encuentren. Son más frecuentes en los límites de la caliza, sobre todo cuando están en posición horizontal.

4.2 Geología estructural

Las estructuras que prevalecen en las rocas de la región se originaron a partir de un régimen compresivo asociado con la margen pacífica, que dentro de sus principales efectos está la deformación dúctil de la carpeta sedimentaria del Terreno Mixteco así como la aloctonía y yuxtaposición de una carpeta de materiales vulcanosedimentarios depositada en otro ambiente geológico (Terreno Guerrero).

En la región se manifiesta una diversidad de afloramientos asociados con rocas metamórficas, sedimentarias marinas (plataforma y cuenca), rocas ígneas extrusivas y en menor proporción rocas ígneas intrusivas, las cuales en ocasiones presentan una evolución sedimentológica independiente y se encuentran relacionadas ya sea por medio de fallas de cabalgadura o bien por fallas laterales inversas, que son el resultado de una dinámica estructural poco vista en otras regiones de México, actualmente en actividad.

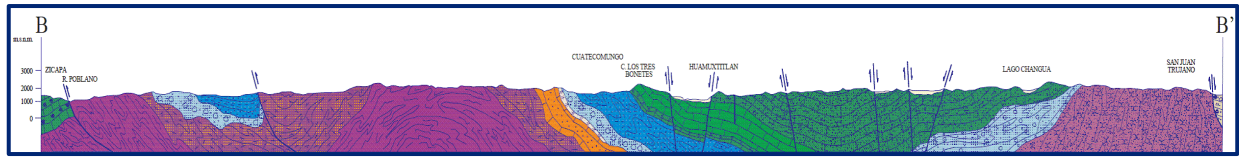
Los rasgos estructurales más sobresalientes están representados por el Sinclinal La Carbonera (Huamuxtitlán), el Anticlinal de Cualác, las fallas normales en el área de Olinalá y un sistema menor de fracturas relacionado a las charnelas de las estructuras plegadas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero 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 ríos, principalmente el Río Tlapaneco, así como en las areniscas, conglomerados polimícticos, tobas, brechas y depósitos vulcanoclásticos, que presentan algunas decenas de metros hacia 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, principalmente las calizas de la Formacuéon Morelos, así como rocas vocánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en 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 memafórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera E14-8 "Chilpancingo". Esc. 1:250,000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas, conglomerados polimícticos, tobas, brechas y depósitos vulcanoclásticos, que presentan un espesor de varias decenas de metros hacia el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente calizas y areniscas de la Formación Morelos y rocas volcánicas; todas ellas con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas. Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de campo realizadas en el estudio de 2011, se ejecutaron 12 pruebas de bombeo de corta duración (de 2 a 8 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, en pozos y algunas norias distribuidos en la zona de explotación de los valles.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de 7.08×10^{-5} a $1.51 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (6.1 a $1304.6 \text{ m}^2/\text{d}$). Los valores más altos corresponden a los depósitos granulares gruesos de los cauces de los arroyos. De acuerdo con el espesor saturado la conductividad hidráulica varía de $8.21 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (0.07 m/d) a $6.27 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (54.2 m/d). Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada durante del estudio realizado en al año 2011.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad del nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2011 registra valores que varían de 2 a 28 m, aumentando gradualmente a lo largo del cauce de los ríos y arroyos, conforme se asciende topográficamente. Los valores más profundos (16 a 28 m) se registran en la porción norte del acuífero, en las inmediaciones de las localidades Huamuxtlán y Cualác; mientras que lo más someros (2 a 14 m) se ubican al sur del acuífero, hacia las localidades de Tlapa de Comonfort y Alpoyeca (figura 4).

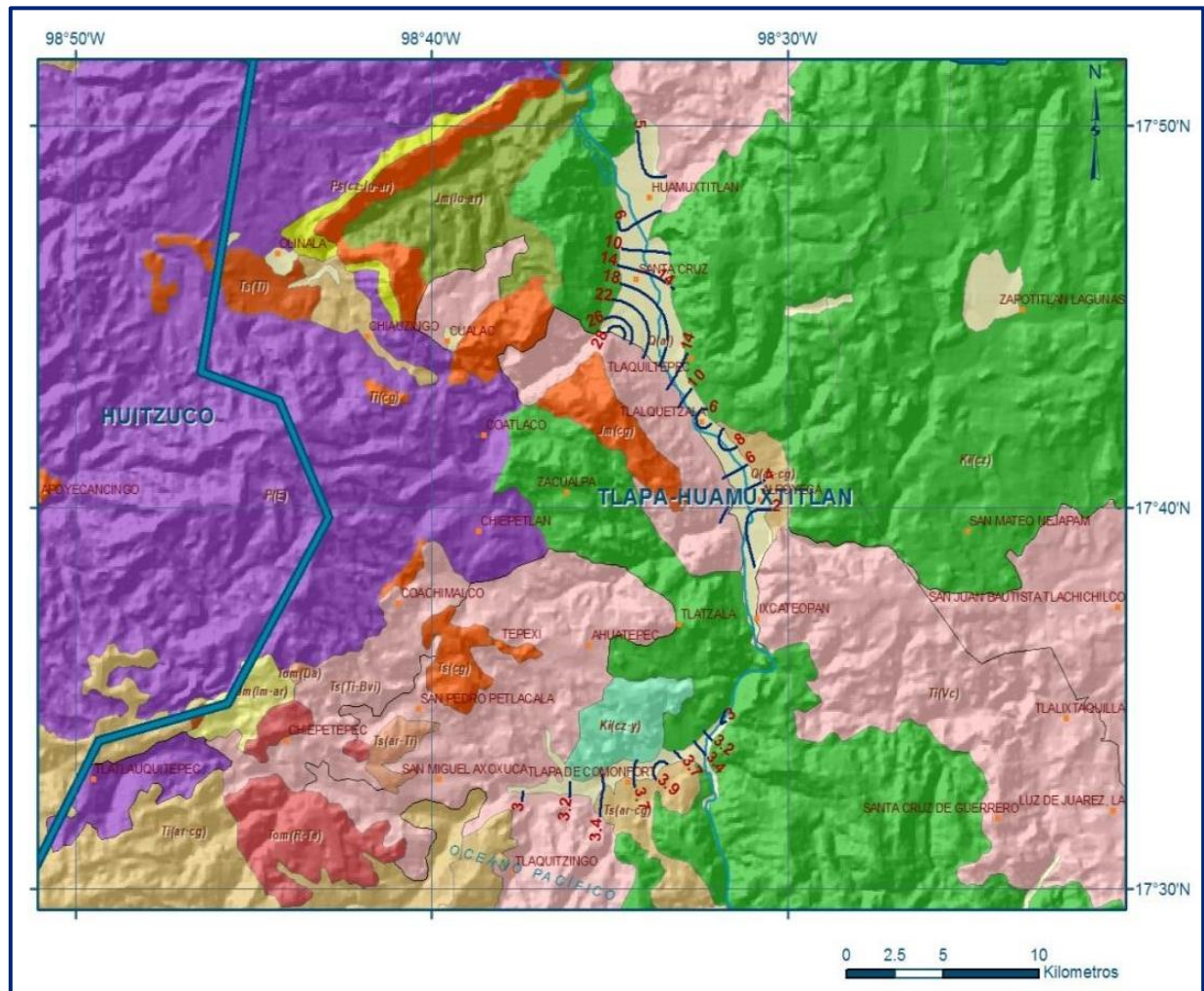


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2011)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo a la elevación del nivel estático para el año 2011, se registran valores de carga hidráulica que varían de 865 a 1,124 msnm, decreciendo desde las partes altas del acuífero, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo (figura 5).

Las mayores elevaciones se registran en la porción centro oeste y disminuyen hacia el norte del acuífero, por lo que la dirección preferencial del flujo subterráneo tiene dos componentes, W-E y SE-NW. El flujo subterráneo no presenta ninguna deformación o cono de abatimiento que sea causado por la extracción de los aprovechamientos existentes, sigue manifestando su condición natural, es decir en dirección de los escurrimientos superficiales.

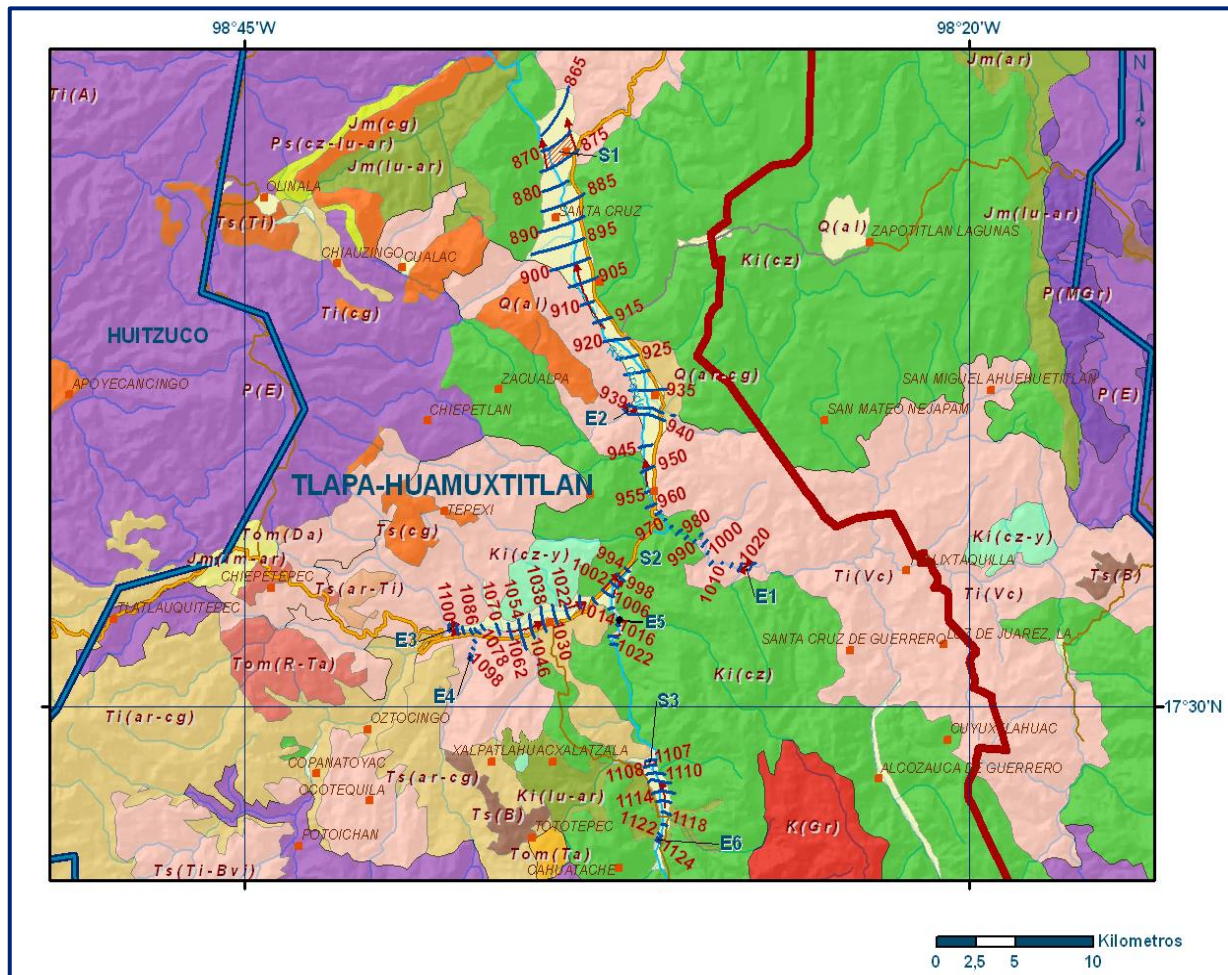


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en algunos recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Además, la configuración de elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción.

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

Las mediciones realizadas en 2011 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2011, se tomaron 23 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente, 12 pozos, 9 norias y 2 manantiales. Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles 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. de STD La concentración de sólidos totales disueltos varía de 174 a 973 mg/lit, sólo tres muestras superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l de STD que establece dicha NOM para el agua potable, relacionadas con la presencia de yesos. Los valores de conductividad eléctrica varían de 71 a 2780 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como la familia dominante a la sulfatada y/o clorurada-cálcica y/o magnésica, que refleja la presencia de rocas evaporíticas.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2011, se registraron un total de 85 aprovechamientos del agua subterránea: 43 pozos, 34 norias y 8 manantiales. Del total, 69 se encuentran activos y 16 inactivos. El volumen total de extracción asciende a 9.1 hm³/año, de los cuales 8.9 hm³ (97.8%) se destinan al uso público-urbano, 0.1 hm³ (1.1%) para uso agrícola y 0.1 hm³ (1.1%) para diversos usos, principalmente doméstico-pecuario. Adicionalmente, a través de manantiales se descarga un caudal de 42 lps, que representa un volumen anual de 1.3 hm³, destinando en su totalidad al uso público-urbano.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2011, en una superficie de 66.0 km² del acuífero, en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos, dividida en 3 áreas: Huamuxtitlán (49 km²), Tlapa (12 km²) e Igualita (5 km²).

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

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

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga natural que recibe (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv) y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para el caso del acuífero Tlapa-Huamuxtitlán sólo se considera el volumen de las fugas en la red de agua potable debido a que el volumen destinado al uso agrícola es muy pequeño.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$), así como las entradas y las salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - D_m - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v : Recarga vertical
- E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal
- R_i : Recarga inducida
- B : Bombeo
- S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal
- D_m : Descarga a través de manantiales
- ETR : Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento

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

$$R_v = B + S_h + D_m + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

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

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2011, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

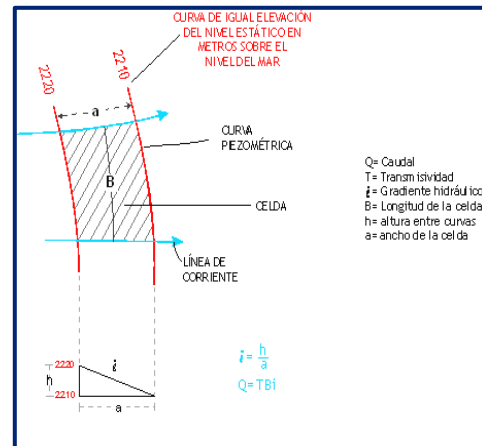
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B= Largo del canal de flujo (m);

i= Gradiente hidráulico (adimensional);

T= Transmisividad (m²/s);



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, el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a 12.2 hm³/año.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2011)

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	481	697	5	0.007174	0.006068	0.0209	0.7
E2	568	453	1	0.002208	0.067200	0.0843	2.7
E3	449	495	4	0.008081	0.044475	0.1614	5.1
E4	189	250	2	0.008000	0.044475	0.0672	2.1
E5	146	320	2	0.006250	0.005866	0.0054	0.2
E6	275	400	2	0.005000	0.035580	0.0489	1.5
Total entradas							12.2

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

7.1.3 Recarga inducida (R_i)

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

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a que el volumen destinado al uso agrícola es incipiente, no se considera recarga por retornos de riego. Debido a que el volumen destinado al uso agrícola es incipiente, no se considera recarga por retornos de riego.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y de alcantarillado varía, en términos generales, de 20 al 45 %.

Para este caso se consideró que el 15% de los 10.2 hm³ anuales destinados al uso público-urbano (8.9 hm³ de agua subterránea y 1.3 hm³ de agua de los manantiales) se infiltra como recarga efectiva al acuífero. Por lo tanto, la recarga inducida es $R_i = 1.5$ hm³ anuales.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por flujo subterráneo horizontal (Sh), bombeo (B), a través de manantiales (Dm) y por evapotranspiración de niveles freáticos someros (ETR).

7.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2011 (figura 5).

El valor estimado es de 1.8 hm³/año, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de Salidas por flujo subterráneo (2011)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2072	1205	5	0.004149	0.002730	0.0235	0.7
S2	554	595	4	0.006723	0.005866	0.0218	0.7
S3	654	332	1	0.003012	0.005847	0.0115	0.4
Total salidas							1.8

7.3.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro en 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.

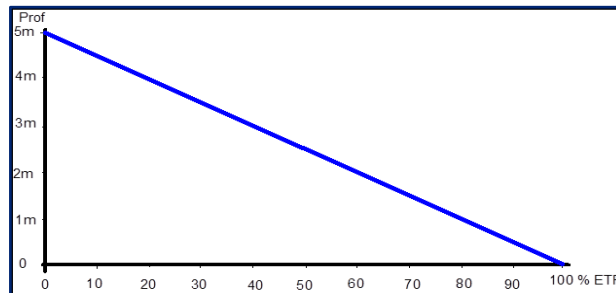
Existen dos formas de Evapotranspiración la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, como se muestra a continuación, considerando el valor promedio anual de temperatura (24.3 °C) y precipitación (899 mm):

$$ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2 (mm)}{L^2} \right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) = 24.3
 P(mm) = 899 P² = 808201
 L = 1624.9 L² = 2640300.01
 ETR (mm) = 818.6

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 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 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100%, a 4 m el 20%, a 2m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida por el % que le corresponde de acuerdo con la grafica anterior. Tomando en cuenta una superficie de 30 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración real obtenida de 818.6 mm (con valores de 899 mm anuales para la precipitación y 24.3 °C de temperatura), de acuerdo con la gráfica anterior: ETR = 30 km² (0.8186 m) (0.4) = 9.8 hm³

7.3.2 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo realizado en 2011, se identificó la existencia de 8 pequeños manantiales dentro de la zona, que en conjunto descargan 42 lps, es decir un volumen estimado de 1.3 hm³/anuales.

7.3.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de 9.1 hm³/año.

7.4 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en algunos recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \\ R_v &= 9.1 + 1.8 + 1.3 + 9.8 + 0.0 - 12.2 - 1.5 \\ R_v &= 8.3 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + Eh + Ri \\ R &= 8.3 + 12.2 + 1.5 \\ R &= 22.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

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, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **22.0 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 dené conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera una descarga por manantiales y el 50 % de la evapotranspiración para preservar el ecosistema ribereño. No se considera comprometido el volumen de las salidas por flujo subterráneo horizontal porque éstas ocurren dentro del acuífero, aproximadamente a 16 km del límite con el acuífero Ixcaquixtla del Estado de Puebla, vecino al norte. Por lo tanto **DNC= 6.2 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 (REPDa), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **6,455,715 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.0 - 6.2 - 6.455715 \\ \text{DMA} &= 9.344285 \text{ hm}^3/\text{anuales}\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **9,344,285 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad del Acuífero Tlapa-Huamuxtitlán (1201), en el estado de Guerrero. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo S.A. de C.V.