



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CHILAPA (1206), ESTADO DE
GUERRERO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	8
3.1 Provincia fisiográfica.....	8
3.2 Clima	9
3.3 Hidrología superficial.....	10
3.4 Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	13
4.1 Estratigrafía	15
4.2 Geología estructural.....	29
4.3 Geología del subsuelo.....	30
5. HIDROGEOLOGÍA.....	31
5.1 Tipo de acuífero.....	31
5.2 Parámetros hidráulicos.....	32
5.3 Piezometría.....	32
5.4 Comportamiento hidráulico	32
5.4.1 Profundidad del nivel estático	32
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	36
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	41
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	42
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	43
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	43
7.1 Entradas.....	44
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	44
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	46
7.2 Salidas	48
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	48
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	48
7.2.3 Descarga por manantiales (Dm).....	50
7.2.4 Bombeo (B).....	51
7.2.5 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	52
8. DISPONIBILIDAD	53
8.1 Recarga total media anual (R)	54
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	54
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	54
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	55
9. BIBLIOGRAFÍA	56

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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

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

1.1 Localización

El acuífero Chilapa, definido con la clave 1206 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oriental del Estado de Guerrero, entre los paralelos 17°29'15" y 17°56'17" de latitud norte y los meridianos 99°02'41" y 99°51'40" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,309 km² (figura 1).

Limita al norte con los acuíferos, Iguala y Poloncingo, al noreste y este con el acuífero Huitzucó, al sur con los acuíferos Chilpancingo y Tepechicotlán, al suroeste con Papagayo y al oeste con el acuífero Tlacotepec, todos ellos pertenecientes al Estado de Guerrero.

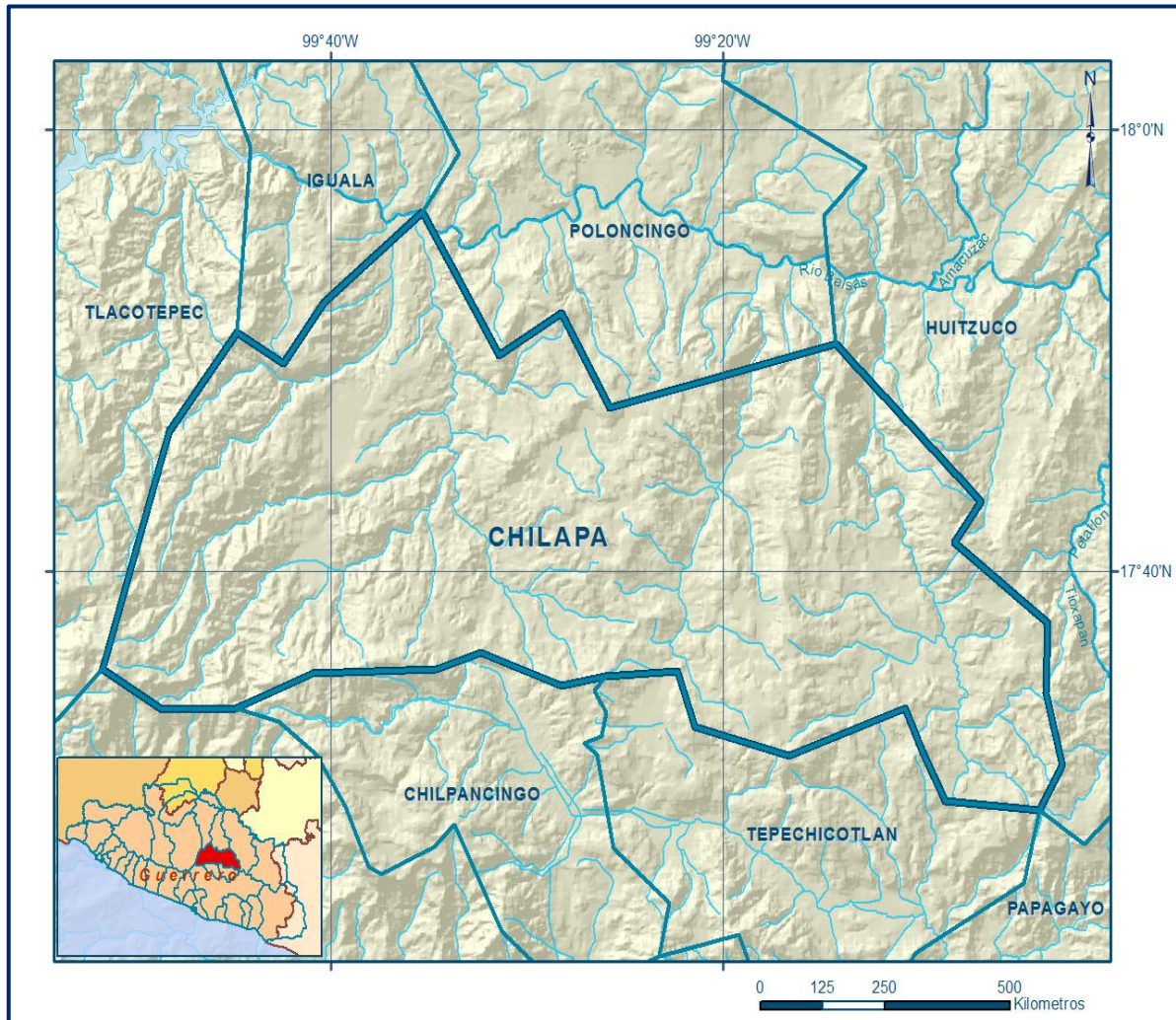


Figura1.Localización del acuífero

Geopolíticamente, comprende parcialmente los municipios Leonardo Bravo, Eduardo Neri, Mártir de Cuilapan, Tixtla de Guerrero, Zitlala, Chilapa de Álvarez, Chilpancingo de los Bravo, Atlixac y Ahuacutzingo.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1206 CHILAPA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	99	9	52.9	17	31	50.8
2	99	10	44.9	17	33	47.7
3	99	16	39.5	17	31	40.0
4	99	21	28.8	17	32	57.7
5	99	22	20.4	17	35	29.6
6	99	26	17	17	35	14.8
7	99	28	16.9	17	34	50.4
8	99	32	22.4	17	36	19.6
9	99	34	37.6	17	35	34.2
10	99	40	56.1	17	35	24.0
11	99	44	50.5	17	33	49.9
12	99	48	36.1	17	33	44.8
13	99	51	40.1	17	35	34.1
14	99	48	14.1	17	46	217
15	99	44	48.8	17	50	49.0
16	99	42	24.5	17	49	23.6
17	99	40	23.4	17	52	8.7
18	99	35	21.1	17	56	17.0
19	99	31	25.1	17	49	47.4
20	99	28	16.4	17	51	42.2
21	99	25	47.8	17	47	24.4
22	99	14	16.9	17	50	16.8
23	99	6	54.0	17	43	10.7
24	99	8	15.6	17	41	19.7
25	99	3	30.5	17	37	39.3
26	99	3	34.7	17	34	29.6
27	99	2	43.2	17	31	15.3
28	99	3	53.0	17	29	10.7
29	99	8	43.6	17	29	38.2
1	99	9	52.9	17	31	50.8

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Chilapa pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Guerrero. El acuífero se encuentra parcialmente vedado, sólo en una pequeña porción de su extremo sur, que pertenece al municipio de Chilpancingo de Los Bravo, está sujeta a las disposiciones del “Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos de los Municipios de Acapulco, Coyuca de Benítez, Juan R. Escudero, San Marcos, Mochitlán y Chilpancingo; Gro”, Publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de febrero de 1975. Este decreto se clasifica como tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Casi en la totalidad de su territorio no rige ningún decreto de veda para la extracción del agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Chilapa, clave 1206, 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 DOF 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.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero no se han realizado estudios geohidrológicos de evaluación, sólo se cuenta con algunos trabajos que contemplaron actividades hidrogeológicas específicas de alcance regional e información piezométrica dispersa en tiempo y en espacio. A continuación, se presenta una breve síntesis de la información contenida en ellos, así como una descripción de la información que se utilizó para este trabajo.

RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO EN LA SIERRA MADRE DEL SUR DE MÉXICO, ENTRE CHILPANCINGO Y ACAPULCO, ESTADO DE GUERRERO, elaborado por Zoltán De Cserna en 1965, para el Instituto de Geología, UNAM. Boletín No. 62.

Contiene una descripción de las condiciones geológicas imperantes en el área comprendida entre los poblados de Chilpancingo, Tierra Colorada y Acapulco, ubicados dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, en la porción centro meridional del estado de Guerrero. Describe de manera detallada la estratigrafía de la región, mencionando cada una de las formaciones y sus características.

ESTUDIO GEOLÓGICO–ESTRUCTURAL Y DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE IGUALA–COCULA, ESTADO DE GUERRERO, elaborado Exploraciones y Estudios Geológicos, Geotécnicos y Geohidrológicos, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1987. El objetivo principal del estudio fue la realización de prospección geohidrológica para determinar y evaluar las condiciones geológicas que gobiernan la ocurrencia del agua subterránea, proponer un modelo hidrogeológico del área e identificar las zonas potencialmente atractivas para su exploración.

Entre las conclusiones más sobresalientes menciona que la zona del acuífero calcáreo se considera atractiva para perforar y contener agua de buena calidad, identificando como áreas favorables la porción norte del Anticlinal Apipilulco así como al norte del Anticlinal Metlapa. El primero de ellos presenta continuidad estructural, una amplia zona de recarga y no manifiesta superficialmente la presencia de yesos; el pozo exploratorio Apipilulco 2 perforado en esta estructura, presentó resultados positivos.

El Anticlinal Metlapa es de menor dimensión, presenta también continuidad estructural y no manifiesta la presencia de evaporitas. Recomienda realizar estudios geológicos detallados en estas estructuras, así exploraciones geofísicas con el método de sondeos eléctricos verticales para ubicar sitios adecuados para la perforación de sondeos exploratorios.

ESTRATIGRAFÍA DE LA REGIÓN DE LA MONTAÑA, ESTADO DE GUERRERO, 1993. Rodolfo Corona Esquivel.

En este trabajo está basado la descripción de la unidades litológicas ya que presenta la estratigrafía detallada de la región.

MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE IGUALA, HUITZUCO, POLONCINGO, CHILAPA Y CHILPANCINGO, ESTADO DE GUERRERO, elaborado por Laramide Ingenieros, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Balsas, en 2005. Este estudio tuvo como objetivos importantes llevar a cabo el censo de aprovechamientos, proponer la red de pozos piloto en cada uno de los acuíferos mencionados, realizar mediciones piezométricas y de parámetros hidrogeoquímicos con mediciones in situ (conductividad eléctrica, temperatura pH, etc.).

Entre sus conclusiones más importantes destacan que los principales acuíferos que se explotan actualmente se alojan en el subálveo de los ríos y no tienen continuidad hidrogeológica a lo largo de ellos, ya que descargan al entrar en barrancas labradas en rocas impermeables; existen también pequeños acuíferos colgados constituidos por depósitos de aluviones y conglomerados arenosos; los manantiales representan una descarga parcial del acuífero regional en calizas y su presencia está asociada a cambios litológicos y a la presencia de fallas que captan flujos que circulan en el acuífero fracturado y lo transmiten hacia las zonas topográficamente bajas, en donde aflora la secuencia conformada por intercalaciones de lutitas y areniscas de baja permeabilidad.

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.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CHILAPA, ALTAMIRANO-CUTZAMALA, ARCELIA, PASO DE ARENA Y COAHUAYUTLA, EN EL ESTADO DE GUERRERO. Realizado en 2013 por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur (Raisz, 1964). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 1991), se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur; Subprovincia Cordillera Costera del Sur. La Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, que posee cierto grado de paralelismo con la costa del Océano Pacífico; se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles. 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 en Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas. Su altitud media es de 2000 msnm, el punto más alto es el cerro Quie Yelaag que tiene una altura de 3710 msnm, en el sur de Oaxaca.

En el occidente, la sierra empieza como Sierra del Alo en los municipios de Tecalitlán y Pihuamo en Jalisco, posteriormente atraviesa Michoacán, donde se le 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 atravesada por numerosos ríos, los cuales forman notables cañones, principalmente en Guerrero, donde las partes altas son conocidas como filos.

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. La Subprovincia Cordillera Costera del Sur, constituye la franja central de la Provincia y se caracteriza por estar constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Representa la zona de transición entre las subprovincias internas (Depresión del Balsas y Sierras y Valles Guerrerenses) y la zona costera (Subprovincia Costas del Sur), desde donde los escurrimientos superficiales se dirigen tierra adentro o hacia la vertiente del Océano Pacífico.

La cordillera está orientada de manera paralela a la línea de costa por más de 650 km, abarca parte del Estado de Michoacán, cruzando todo el Estado de Guerrero y parte del Estado de Oaxaca. Se encuentra limitada al norte por la Depresión del Balsas y al sur por los lomeríos de la vertiente sur, así como por la planicie costera del Pacífico. En algunos sitios presenta elevaciones que sobrepasan los 3,000 msnm, aunque su altitud promedio es del orden de los 2,000 msnm. La vertiente sur de la sierra se caracteriza por estar fuertemente disectada por arroyos y ríos que drenan hacia el sur-suroeste, desembocando en el Océano Pacífico.

3.2 Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García, se determina que en la superficie que cubre el acuífero predominan los climas A(C) semiárido y (A) cálidos con lluvias en verano, con temperatura media anual mayor de 22 °C, del mes más frío menor a 18°C y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2%, con algunas variantes que, en orden de importancia son: A(C)w1(w) semicálido subhúmedo, que se presenta al sur del acuífero, con índice P/T entre 43.2 y 55; BS1(h')w(w) semiárido cálido, que se presenta en las partes topográficamente más altas; A(C)w0(w) semicálido subhúmedo del grupo C, que se registra en la porción central del acuífero, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm e índice P/T menor de 43.2; Aw0(w) cálido subhúmedo con índice P/T menor de 43.2 y altura de precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm, se presenta en la porción central y oriental en forma de franjas orientadas en sentido norte-sur; A(C)w2(w) semicálido subhúmedo con índice P/T mayor de 55 y precipitación del mes más seco menor a 40 mm, se registra en la porción suroriental.

Por último, el clima C(w2)(w) templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente menor de 22°C, que se registra en la porción serrana del acuífero, a elevaciones que varían de 2,000 a 2,500 msnm, se presentan en la porción oriental, en una franja orientada en sentido norte-sur

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.

Para la determinación de las variables climatológicas, se cuenta con información de 6 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Apango, Chichihualco, Zumpango del Río, Chilapa, Huitziltepec y Xochipala, cuyo periodo de registro es 1981-2010.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **817 mm y 22.0 °C** respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial media, su valor es de **1,957 mm anuales**.

3.3 Hidrología superficial

El área cubierta por el acuífero pertenece a la Región Hidrológica No.18 Balsas, Subregión Hidrológica Medio Balsas, cuenca Río Balsas-Mezcala.

Esta cuenca se encuentra delimitada al norte por las cuencas de los ríos Grande de Amacuzac y Balsas-Zirándalo, al sur por las cuencas de los ríos Papagayo y Atoyac; y al este por las cuencas Atoyac y Tlapaneco.

Su extensión es de 14,162 km² y su principal corriente superficial es el Río Balsas conocido localmente como Mezcala; dentro de su superficie se encuentra la presa Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa o "El Caracol".

En el área de la cuenca se encuentran pequeñas subcuencas que forman el caudal de ríos y arroyos perennes e intermitentes cuyo patrón de la red de drenaje es de tipo dendrítico y sus principales afluentes son el Ríos Tlapehudapa y Huacapa; tributarios del Río Balsas por su margen izquierda.

El Río Tlapehudapa nace con el nombre Río Atempa, en su trayectoria atraviesa la barranca Atzacualco presentando dirección sur-oeste, en su paso por la comunidad

Mexcaltepec cambia su rumbo a norte, pasando por la zona urbana de Atzacaloya, a la altura de la comunidad Nejapa recibe el caudal de Río Ojolotero y sigue con dirección noroeste pasando por Acatlán, la cabecera municipal de Zitlala, donde cambia de nombre por el de Tlapehudapa, posteriormente se incorpora por la margen izquierda al río Balsas.

El Río Huacapa se origina con escurrimientos del cerro Pachón con el nombre Río Piedras Grandes, presentando dirección preferencial noroeste, en la cabecera municipal Chichihualco recibe por su margen derecha las aguas del Río Michapa y a escasos dos kilómetros aguas abajo confluye con los Ríos Huacapa Tlapehudapa, para posteriormente incorporarse por la margen izquierda al Río 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 de 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 comprendidas 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. En las barrancas profundas y valles intermontanos las elevaciones se encuentran orientadas en una dirección NS y NNE-SSW y por lo común 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 de terreno (lomeríos y sierras) que presentan elevaciones mayores a 2,500 msnm; en las rocas ígneas no se manifiesta continuidad longitudinal sino relieves aislados. En lo que respecta a las zonas de menor relieve asociadas con lomeríos y valles, están conformados por rocas incompetentes con elevaciones máximas de 2,000 msnm con un drenaje dendrítico de alta densidad, en donde los cauces son estrechos y las pendientes aproximadamente de 10%.

4. GEOLOGÍA

La Sierra Madre del Sur (SMS) está compuesta por bloques corticales distintos, delimitados por fallas principales y caracterizados por conjuntos litológicos diferentes (Campa y Coney, 1983). Con base en las variaciones litológicas, Campa y Coney (1983) y Sedlock et al. (1993) subdividieron la SMS en terrenos tectonoestratigráficos, caracterizados por historias sedimentarias y tectónicas diferentes, que fueron amalgamados sucesivamente, durante el Paleozoico y el Mesozoico, mediante acreciones múltiples, a lo largo de la margen continental pacífica de Norte América (figura 2).

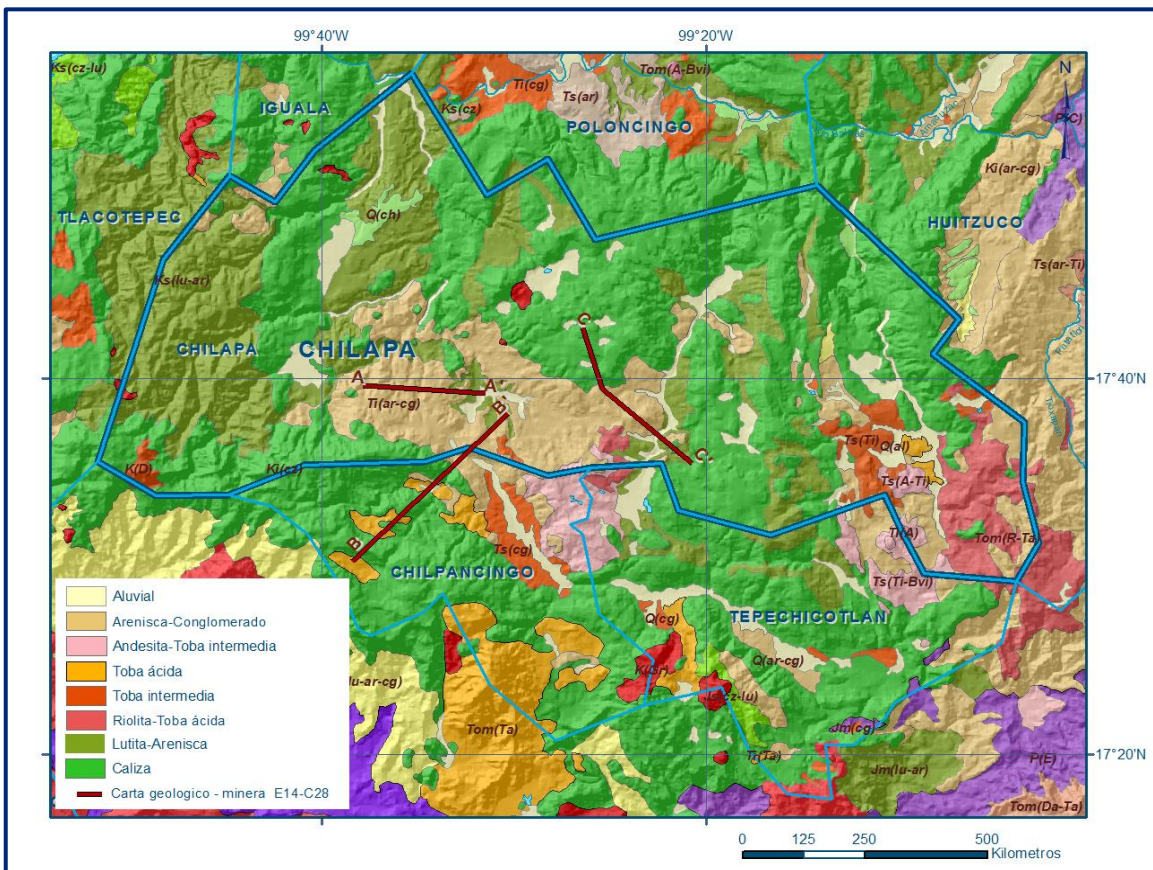


Figura 2. Geología general del acuífero

En la última década, el detalle creciente en la estratigrafía y las estructuras mayores del sur de México ha llevado muchos autores a modificar parcialmente la distribución y la nomenclatura de los terrenos del sur de México (Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000; Dickinson y Lawton, 2001; Keppie, 2004; Talavera-Mendoza et al., 2007; Centeno-García et al., 2008).

Es por esta razón que la extensión geográfica, el número, los límites y los nombres de los terrenos varían considerablemente dependiendo de los autores.

De acuerdo a la división de terrenos tectonoestratigráficos, la región en la que se ubica el acuífero en la transición entre la Plataforma Guerrero-Morelos y el Subterreno Teloloapan.

En la región dentro de la cual se ubican las diferentes unidades hidrogeológicas estudiadas se manifiesta una diversidad de afloramientos asociados con rocas metamórficas, sedimentarias marinas tanto de plataforma como de cuenca, rocas ígneas extrusivas y en menor proporción rocas ígneas intrusivas, con una evolución sedimentológica independiente, relacionadas ya sea por medio de fallas de cabalgadura o bien por fallas laterales inversas, mostrando la gran dinámica estructural característica de esta región sur del país, con actividad tectónica en la actualidad.

Se considera que las relaciones que guardan esta diversidad de rocas asociadas a cada terreno tectonoestratigráfico definen su evolución dentro de un régimen de deformación compresiva.

Las rocas metamórficas son las de mayor antigüedad y se considera que se encuentran conformando el basamento del Terreno Mixteco, sobre el cual se depositó una secuencia sedimentaria transgresiva (conglomerados, areniscas y lutitas) de Edad Paleozoica y posteriormente en el Mesozoico la sedimentación se tornó gradualmente calcárea hasta llegar a implantarse durante el Cretácico Inferior una vasta plataforma conocida como Plataforma Guerrero Morelos, sobre la cual se depositaron secuencias carbonatadas de sub-ambientes de borde (arrecife), lagunares y restringida (evaporitas), la sedimentación de plataforma posteriormente queda interrumpida por el depósito de una secuencia flysch del Cretácico Tardío.

La gran diversidad de rocas que presenta la superficie estudiada, son un reflejo de la complejidad estructural y estratigráfica que presenta la región, las cuales se encuentran estrechamente relacionadas con la evolución tectónica en este sector del Estado de Guerrero, la cual Campa (1979) considera que corresponde con la continuación del dominio cordillerano occidental del Continente Norteamericano.

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).

4.1 Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas intrusivas, volcánicas y metamórficas, cuyo registro estratigráfico comprende del Paleozoico al Reciente. A continuación se describe de manera sencilla las distintas unidades identificadas, de la más antigua a la más reciente en cada uno de los subterrenos

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. Las rocas del Subgrupo Petlalcingo derivan de una sedimentación clástica marina de ambiente pelágico, formado por grauvacas, lutitas, calizas y rocas volcánicas de composición básica.

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).

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.

En el área de estudio, su contacto inferior con las rocas del Complejo Acatlán no se observa, ya que se encuentra intrusionado por el Tronco de Zoquiapa; en la Cañada Llorona se observa que la Ignimbrita Las Lluvias sobreyace discordante a la Formación Olinalá. Por las características litológicas y paleontológicas que presenta, 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.

ERA MESOZOICA

Sistema Jurásico

Grupo Consuelo.

Formación Rosario

Nombre formacional propuesto por Erben (1956), para designar una secuencia constituida por un conglomerado basal, areniscas de color gris, rojizo y amarillento, de grano fino a medio; de estratificación media y delgada, limolitas de los mismos colores, de estratificación delgada; lutitas y lodolitas negras, carbonosas y con vetas de carbón cuya localidad tipo se ubica en el cerro que se encuentra cercano al poblado El Rosario, situado al suroeste de Tezoatlán, Oaxaca.

Está constituida por areniscas de grano fino a medio, de color verdoso, en capas con espesores de 5 a 60 cm que intemperizan en forma nodular; areniscas conglomeráticas en capas de 10 a 20 cm de espesor, con clastos de rocas ígneas y metamórficas; lutitas de color gris oscuro y café en paquetes de 30 a 50 cm de espesor, con gran cantidad de restos de plantas intercaladas y esporádicos paquetes de carbón. Se reporta un espesor parcial de 110 m en una sección levantada entre Santiago Ayuquililla y Chila de Flores. En Yucuquimi de Ocampo se reporta un espesor parcial de 630 m y en Santa Catarina Yutandú, su espesor parcial es de 450 m; estas dos localidades se ubican en la porción sur.

Formación Huajuapán de León

De acuerdo con sus características litológicas y paleontológicas, se infiere un origen continental, con facies fluviales y lacustres, en forma de abanicos aluviales que rellenaron las depresiones existentes. Con base en la flora fósil que contiene esta formación, se le sitúa en el Jurásico Inferior. Es correlacionable con la Formación Barranca Superior del Estado de Sonora y con la Formación Huayacocotla del Estado de Veracruz.

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 aflora de 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-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 Jurásica Media (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 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 Huamuxtlán, 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 y su porción superior está conformada por estratos completamente marinos. Litológicamente está conformada por 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.

Su espesor 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 Aleniano-Bathonia. Se depositó en un medio paludal, como lo sugieren su litología y su alto contenido orgánico.

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. Su espesor varía entre 50 y 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

El 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 sobryace de manera concordante y transicional a la Formación Taberna y subyace concordantemente a la Formación Otatera. Su localidad tipo se ubica en 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 que varía de 80 a 100 m. Su depósito 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 sobryace 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 a 70 m.

Formación Yucuñuti

El nombre fue utilizado por Erben (1956), para designar a una secuencia de coquinas de ostras, 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 a 200 m, aunque generalmente oscila entre 50 y 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).

Caliza Chimeco

Nombre formacional utilizado por vez primera por Pérez Ibarguengoitia (1965), para designar una secuencia de calizas y calcarenitas compactas y sucias, de color gris parduzco y café, con estilolitas paralelas a la estratificación; definiendo como localidad tipo el Cerro Chimeco, que se localiza al norte del Arroyo Tecomazuchil, a 5.6 Km al oeste de Petlalcingo, Puebla.

Está constituida por un grainstone de oolitas, en estratos medianos a gruesos, con horizontes arcillosos e interestratos de bioclastos, con estratificación cruzada y laminaciones, estilolitas paralelas a la estratificación, huellas de oleaje y corrugamiento. Su color es gris amarillento en la roca fresca y gris amarillento al intemperismo. Sobreyace transicional y concordantemente a la Formación Tecomazúchil y subyace de la misma forma a la Formación Mapache. Por su posición estratigráfica con respecto a la Formación Tecomazúchil del Jurásico Medio y con la Formación Mapache del Kimmeridgiano-Tithoniano, se le considera de Edad Oxfordiano.

Es correlacionable en tiempo con la Formación Santiago de la Cuenca de Magiscatzin, con las formaciones Zuloaga y La Gloria del norte de México. Su contenido faunístico y la litología que la caracterizan, permiten inferir que su depósito se realizó en un ambiente marino de intermarea, barras de marea a laguna semirestringida con ligero aporte de terrígenos.

Formación Mapache

Con este nombre formacional Pérez-Ibarguengoitia (1965) se refirió a una secuencia de calizas arcillosas con interestratificaciones de lutitas calcáreas y limolitas, definiendo como localidad tipo la Barranca del Mapache, ubicada a unos 5.2 Km al oeste de Petlalcingo, Puebla. Está constituida principalmente por mudstone a packestone de bioclastos, en estratos delgados a medianos, con interestratificaciones de margas en estratos delgados a laminares, con exfoliación nodular que contiene abundantes moluscos.

Sobreyace de manera transicional y concordante a la Formación Chimeco y le sobreyace de manera discordante la Formación Teposcolula. Por su posición estratigráfica sobre la Caliza Chimeco del Oxfordiano y por su contenido faunístico, se considera que su edad corresponde al Kimmeridgiano-Tithoniano. Es correlacionable con la Formación Sabinal del área de Tlaxiaco; con la Formación Las Trancas del área de Zimapán; con las formaciones: Santiago, San Andrés, Tamán y Chipoco de la Cuenca Tampico-Misantla, así como con las formaciones La Caja y La Casita del norte de México.

De acuerdo con su litología y contenido faunístico, se considera que el depósito de esta formación se llevó a cabo en un medio ambiente lagunar, sobre una plataforma con circulación restringida.

Formación Sabinal

Nombre propuesto por Cartagena-Hernández (1981), para designar al miembro basal que López-Ticha (1970) había considerado dentro del Grupo Sabinal. Su localidad tipo la ubica en el Cerro Titania muy cerca de la Ciudad de Tlaxiaco.

Está constituida por mudstone a packestone, en estratos medianos a delgados con algunos estratos gruesos e intercalaciones arcillosas, contiene también packestone de bioclastos en estratos medianos a gruesos, ligeramente dolomitizados, con estratificación cruzada, microlaminaciones, estratos turbidíticos y estilolitas paralelas a la estratificación. El color en general es gris oscuro y adquiere una tonalidad color pardo amarillento por intemperismo.

Sobreyace de manera transicional por cambio de facies a la Formación Mapache; subyace de manera concordante en forma brusca a la Formación Ojite del Grupo Tlaxiaco.

Con base en su posición estratigráfica sobre la Formación Mapache del Oxfordiano y bajo la Formación Ojite del Berriasiano-Valanginiano, se considera que la Formación Sabinal es de edad Kimmeridgiano-Tithoniano. Se le correlaciona en tiempo con la Formación Chimeco de esta misma región. Con apoyo en sus características litológicas y sedimentológicas, se infiere que se depositó en un medio ambiente marino nerítico con influencia batial, en el cual existieron ambientes reductores que propiciaron la preservación de materia orgánica.

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 stratigráficas, 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 Tlaltepaji

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 delgadas 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 Inferior 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 *Nummoloculina 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 Laramide se hacen evidentes en la deformación de las estructuras ya existentes y en el plegamiento de las rocas post-jurásicas

Formación Yucunama (Formación Mezcala)

Nombrada inicialmente por Salas (1949), como Margas Tilantongo, para designar una secuencia margosa, que aflora en las inmediaciones del poblado de Tilantongo y Chilá de Flores; López-Ticha (1975), nomina como Formación Chilá a la secuencia descrita por Salas (op. cit.). González-Alvarado (1970), y Ferrusquia-Villafranca (1970), la definen formalmente como Formación Yucunama y Marga Yucunama respectivamente, para designar una secuencia constituida por margas, lutitas y calizas, que sobreyacen a la Formación Teposcolula, situando la localidad tipo en el poblado de Yucunama, Oaxaca.

Está constituida por margas en estratos delgados, de color gris oscuro; mudstone color gris oscuro en estratos delgados y lutitas laminares ligeramente calcáreas de color verde amarillento. Su espesor en el área es muy reducido, pero en otras localidades se han observado hasta 800 m.

En el área sobreyace normal y concordantemente a la Formación Teposcolula y a los Yesos Tlaltepéxi y le sobreyace de manera discordante la Formación Huajuapán y a la secuencia volcánica del Cenozoico. Por la posición estratigráfica que guarda con las rocas que la encajonan y por su contenido microfaunístico, se considera que se depositó durante el periodo Turoniano-Maestrichtiano.

Es correlacionable en tiempo con las formaciones Maltrata y Guzmantla de la Plataforma de Córdoba y con las formaciones Cuautla y Mezcala de la Cuenca Morelos-Guerrero. Las microfacies descritas de esta unidad, se consideran como depósitos de plataforma con circulación restringida, con un considerable aporte de terrígenos, que indican una facies de relleno de cuenca de tipo flysch arcillo-calcáreo.

ERA CENOZOICA

Sistema Eoceno-Oligoceno

Formación Huajuapán (Grupo Balsas)

Barreda (1946), la denomina como Formación Cuicatlán, para designar a los conglomerados color rojizo, que afloran en el poblado de Cuicatlán, Oax. 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, que está constituido por limolitas, areniscas y tobas; y Miembro Volcánico, el cual tiene un predominio de rocas volcánicas con esporádicas intercalaciones de limolitas.

El Miembro Catarina está constituido por un conglomerado calcáreo bien cementado, en una matriz arcillosa, con fragmentos bien redondeados de calizas de la Formación Teposcolula; los estratos varían de medianos, gruesos a masivos, que presentan en superficie una capa calichosa de hasta 2 metros de espesor.

El Miembro Tezoatlán, lo constituyen una alternancia bien estratificada de arenas, limos, tobas, ignimbritas y estratos delgados de yeso de color blanquecino. El Miembro volcánico lo forman rocas volcánicas de composición ácida a intermedia.

El espesor total observado en el área de estudio es de aproximadamente 200 m. Con base en su 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; es correlacionable con las formaciones Tamazulapán, Tehuacán, Grupo Balsas, Texcoco y Ahuichila del norte de México.

Esta unidad se depositó en un medio ambiente netamente continental, con intensa actividad ígnea y al mismo tiempo fuerte erosión, causada por un rápido levantamiento producido por la fase paroxismal de la Orogenia Laramide, por lo que se considera un depósito de tipo “molasa” postorogénico.

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 está 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. En la región norte de La Montaña de Guerrero, 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 el fallamiento a rumbo ha desplazado y truncado estructuras. Una de las más relevantes es la falla Huamuxtitlán.

Sistema Cuaternario

Aluvión y Depósitos de Talud

Los depósitos fluviales se observan principalmente a lo largo de los cauces de los ríos y arroyos; los sedimentos aluviales rellenan los pequeños valles intermontanos y las márgenes de las corrientes principales; están constituidos por material fino a arenoso sin consolidar; arcillas y arenas derivadas de la denudación de las regiones topográficamente más altas. Los sedimentos fluviales están constituidos por conglomerados sin consolidar, cuyos componentes son fragmentos de rocas volcánicas, tobas, rocas intrusivas y calizas; subangulares a subredondeadas, normalmente en una matriz arcillo-arenosa de la misma composición.

4.2 Geología estructural

La deformación más espectacular del área se presenta en el Terreno Mixteco en forma de anticlinorios y sinclinorios mayores que ponen en contacto rocas del Paleozoico y otras tan jóvenes como los depósitos del Mioceno.

Se observan además franjas de cizalla, tectonitas y sistemas de fallas compuestas de decenas de km de longitud, donde ocurren intrusivos, especialmente en el límite entre terrenos. En el centro-norte y hacia el oriente de la gran falla Apango-Copalito, activa en un segmento de aproximadamente 15 km, los pliegues mayores tienen una dirección NE-SW, uno de cuyos flancos está claramente recostado hacia el SE.

Estos son: el anticlinorio Zicapa-San Juan Las Joyas, raíz de la Cabalgadura Papalutla, el sinclinorio Mitlacingo-Textixic, anticlinorio Ocotitlán, sinclinorio Olinalá-Huamuxtítlán, hasta la franja de tectonitas del sistema de fallas N-S Ocomatlán-Guadalupe Ramírez, ubicadas al noroeste de la región.

Hacia el noroccidente de esta gran falla, se observa el anticlinorio El Floreado orientado en dirección N-S, que cabalga hacia el occidente de La Esperanza, donde abruptamente se quiebra en dirección NWW-SEE, hacia San Francisco Ozomatlán y se abre en abanico.

En el extremo oriental, en la región de La Mixteca, los pliegues mayores se orientan en sentido NNW-SSE con topografía invertida: Jícara Mariscal, sinclinal Atenango-Libres, sinclinorio Juxtlahuaca hasta el anticlinal Río Salado Carrizal que se interna hacia Tlaxiaco mediante una gran falla lateral.

Otro dominio estructural se presenta en el extremo noroccidental y se caracteriza por una serie de estructuras orientadas en sentido N-S y recostadas al oriente, sobre las cuales descansan las napas y cabalgaduras del Terreno Teloloapan.

El anticlinorio Zicapa-San Juan de Las Joyas termina al sur de un gran pliegue semicircular alrededor de Chilapa que está conformado por el flanco NW-SE inclinado al SW del sinclinal Quechultenango, mismo que se torna vertical al norte de Colotlipa y cambia su orientación NE-SW en la sierra de Hueycantenango-Tepozonalco.

A partir de este nudo de estructuras, los pliegues se deforman en napas y escamas orientadas hacia el sur, que terminan abruptamente rotas por la deformación frágil asociada a franjas sigmoides de tectonitas, cuyas orientaciones siguen un rumbo general NW-SE dominante en todo el sur, a lo largo del contacto con el Terreno Xolapa, que incluye plutones graníticos que intrusionan aprovechando estas zona de debilidad. Al sur, sobre gneises y migmatitas del Terreno Xolapa descansan escamas y klippe de unidades litoestratigráficas características del Terreno Mixteco.

Las orientaciones preferenciales son NW-SE, aunque están representadas en menor proporción y más cortas las orientadas en dirección NE-SW y E-W que controlan la mineralización. Sobresalen las fallas compuestas que controlan el klippe denominado El Moño-La Venta y la falla compuesta de Xoxondacua, que pone en contacto a los Terrenos Acatlán y Xolapa y provoca la formación de tectonitas con inclinaciones de 80° NE.

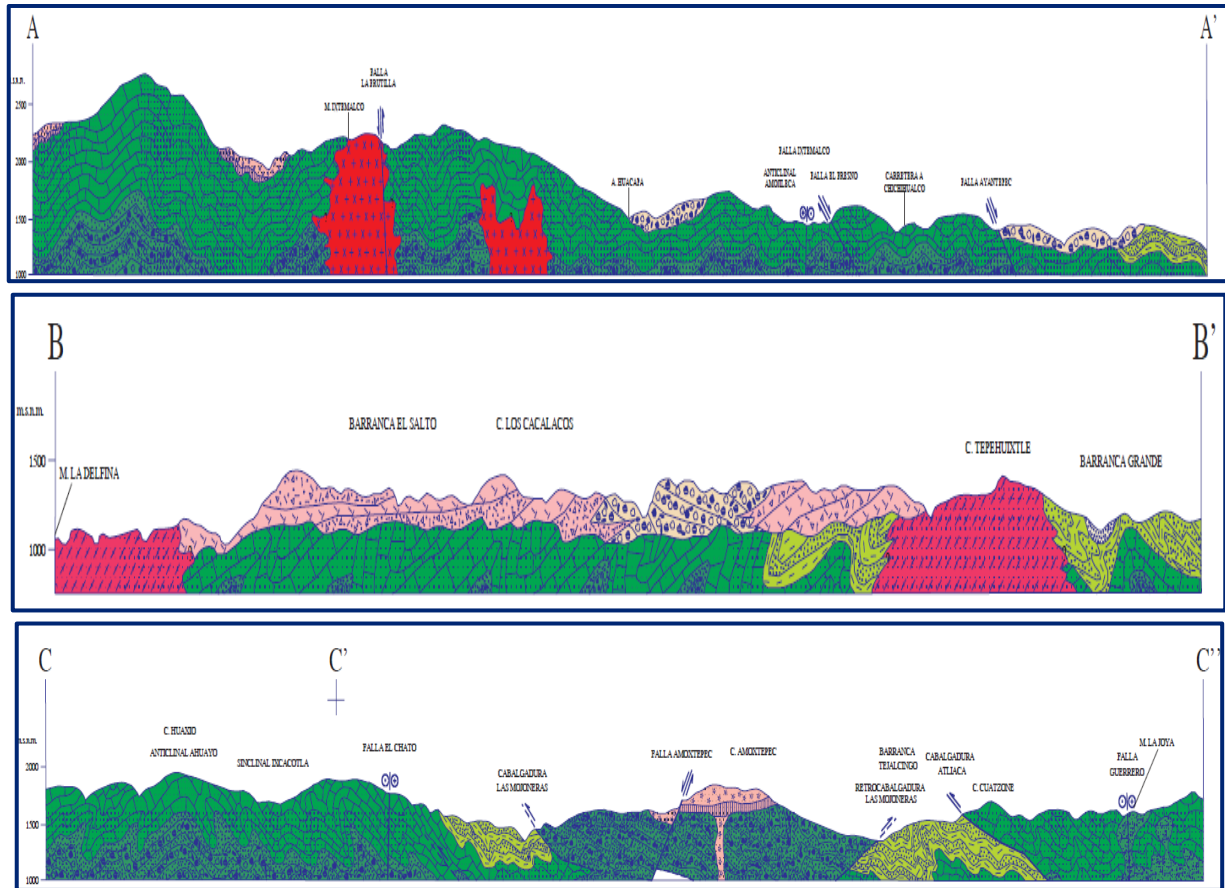
El análisis gráfico de mediciones de estructuras, ordenado por unidades litoestratigráficas y estructuras mayores en la región, aporta una posible cronología de fases compresivas con respuestas diferenciales desde el Proterozoico Superior hasta el presente, que explica diversas ocurrencias minerales (Carta Geológico-Minera Chilpancingo E14-8, escala 1:250,000. SGM, 1998)

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, así como en las areniscas, conglomerados polimícticos, tobas, brechas y depósitos vulcanoclásticos, que presentan algunas decenas de metros hacia el centro de los valles intermonatnos que se encuentran diseminados en toda la superficie del acuífero. 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 Formacúon Teposcolula, 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 metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-C28 "Chilpancingo". Esc. 1:50,000 (SGM, 2006)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer la presencia de acuíferos aislados de **tipo libre** heterogéneos y anisótropos, constituidos, en su porción inferior, por un medio granular poroso conformado por los depósitos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como conglomerados de granulometría diversa, no consolidados y semi-consolidados, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la

zona; estos materiales presentan permeabilidad media a baja y se ubican en los cauces de los ríos y arroyos, así como en los pequeños valles intermontanos.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente calizas y areniscas de la Formación Teposcolula 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 2013, se ejecutaron 14 pruebas de bombeo de corta duración (de 4 a 7 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, en aprovechamientos que extraen agua de los materiales granulares que rellenan los valles intermontanos.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **3.0×10^{-6} a $13.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (0.3 a $1192.3 \text{ m}^2/\text{d}$).**

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 **$1.13 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (0.01 m/d) a $2.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (23.3 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 el año 2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad del nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 registra valores que varían de 1 a 36 m, aumentando gradualmente a lo largo del cauce de los ríos y arroyos y en los valles intermontanos, conforme se asciende topográficamente, hacia las sierras que lo delimitan. Los valores más profundos, de 30 a 36 m, se registran en la porción occidental del acuífero, en las inmediaciones de poblado Chichihualco; mientras que

lo más someros, de 1 a 5 m, en las zonas en donde se ubican las comunidades Pantitlán, Rancho Las Lomas, Huitziltepec, Apango y Atliaca (figuras 4 a 8).

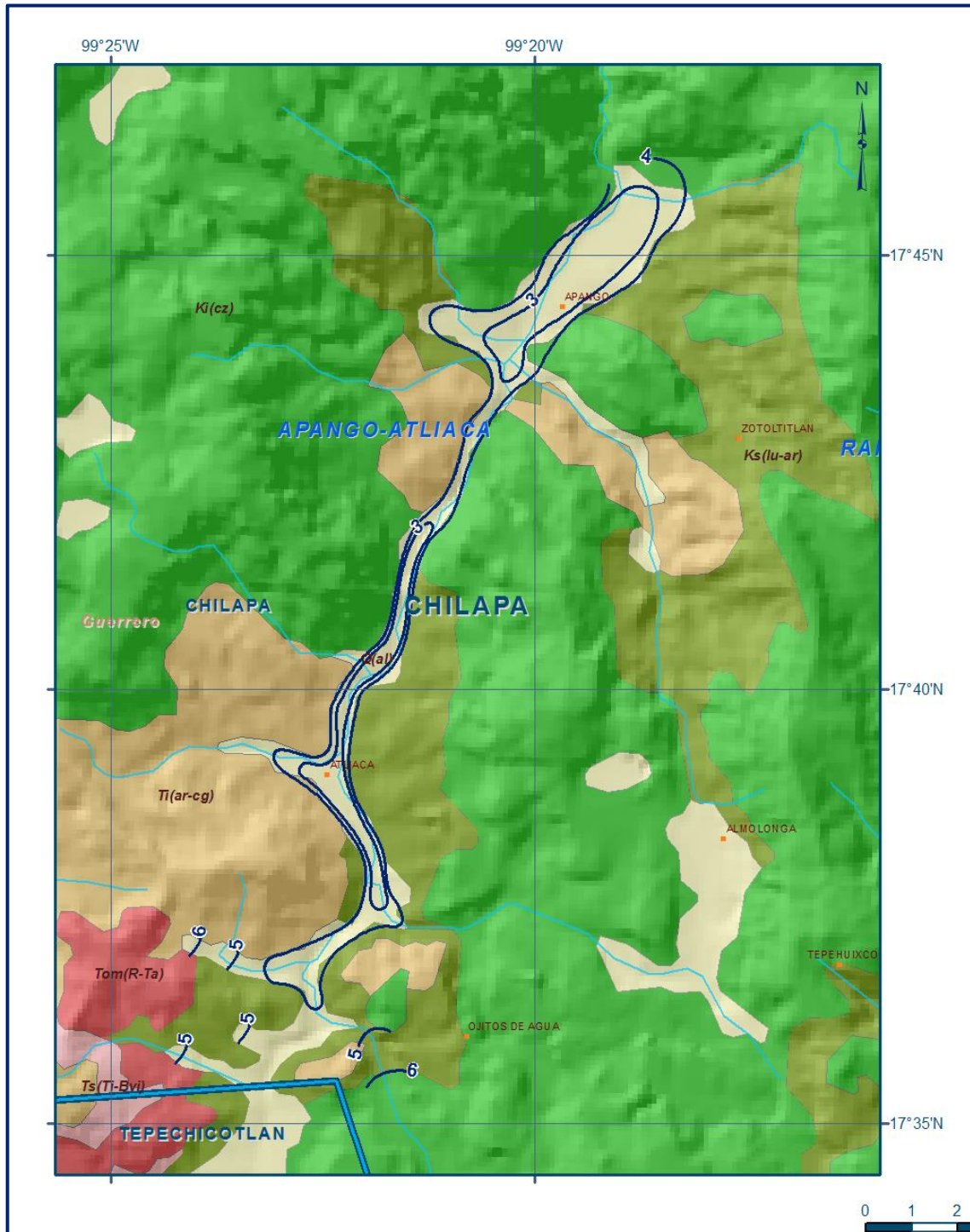


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zona Apango-Atliaca

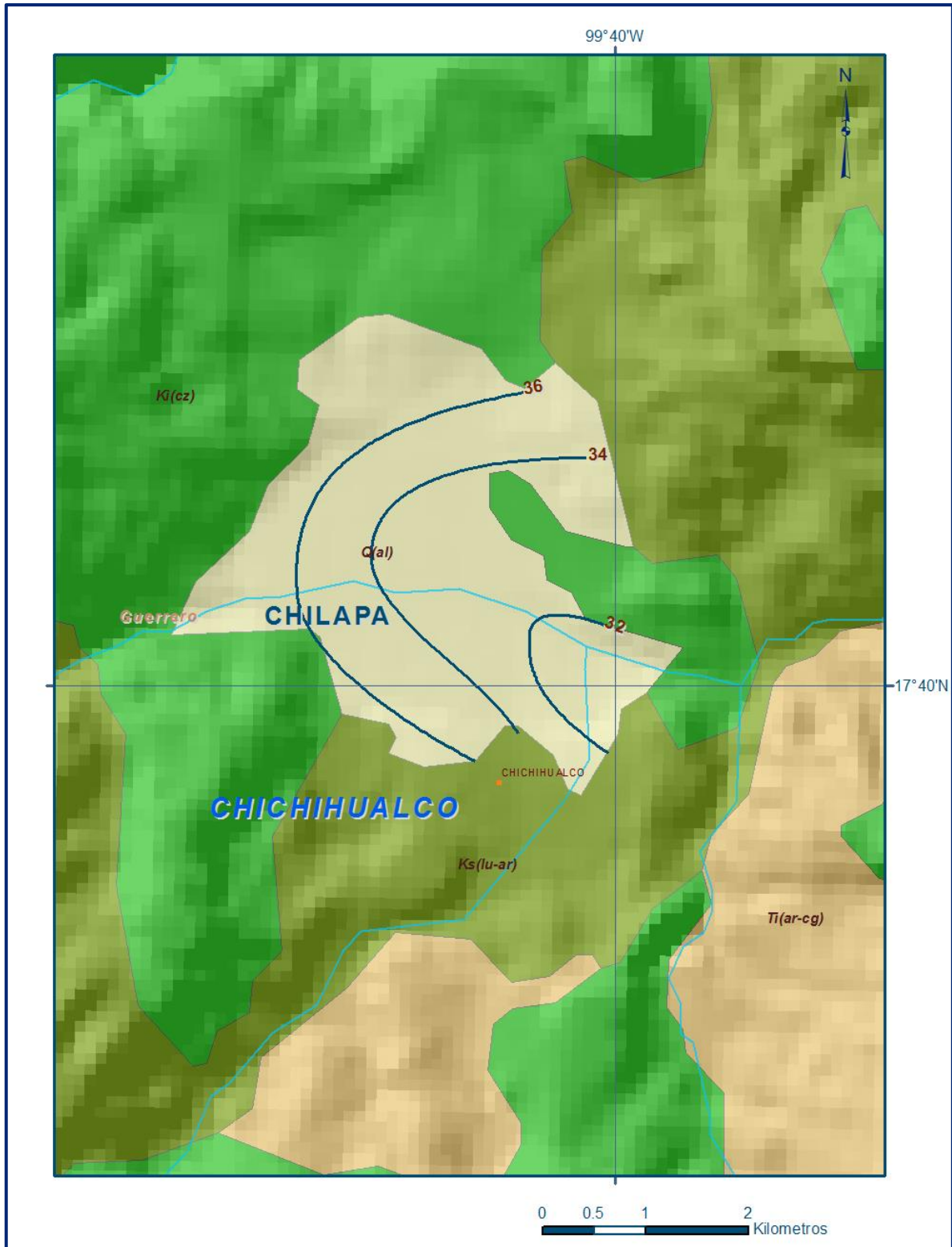


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zona Chichihualco

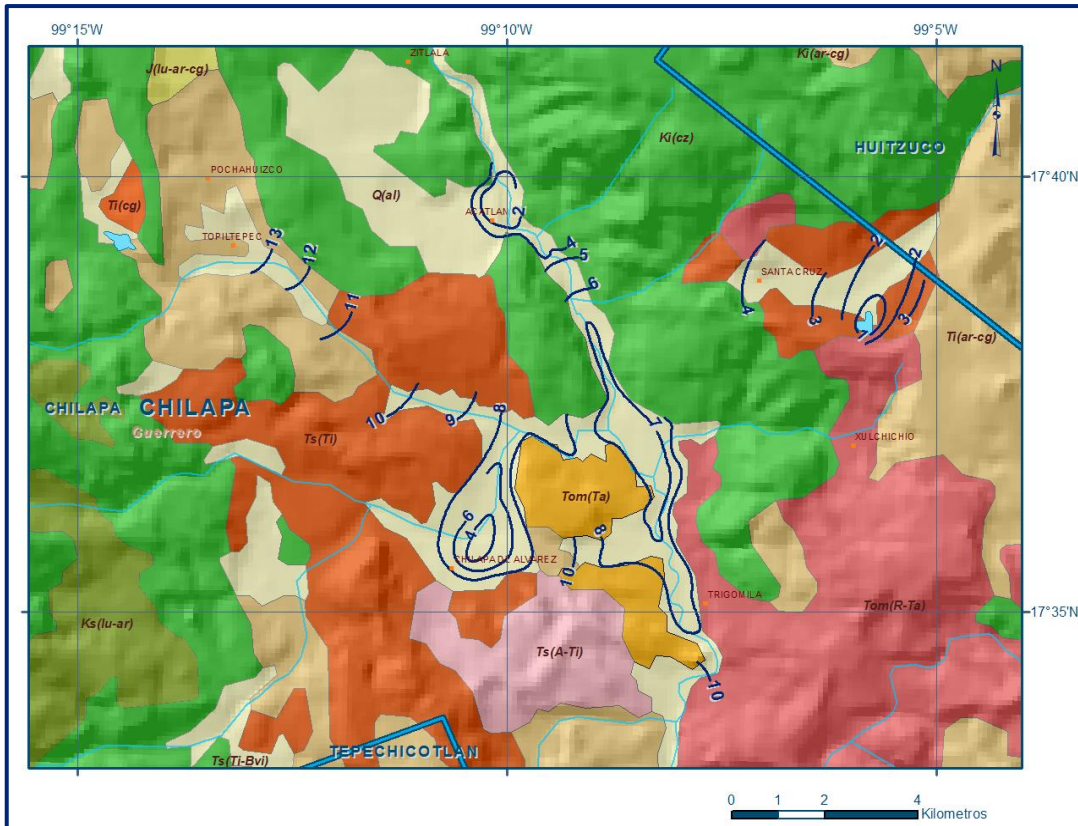


Figura 6. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas Chilapa-Zitlala y Pantitlán

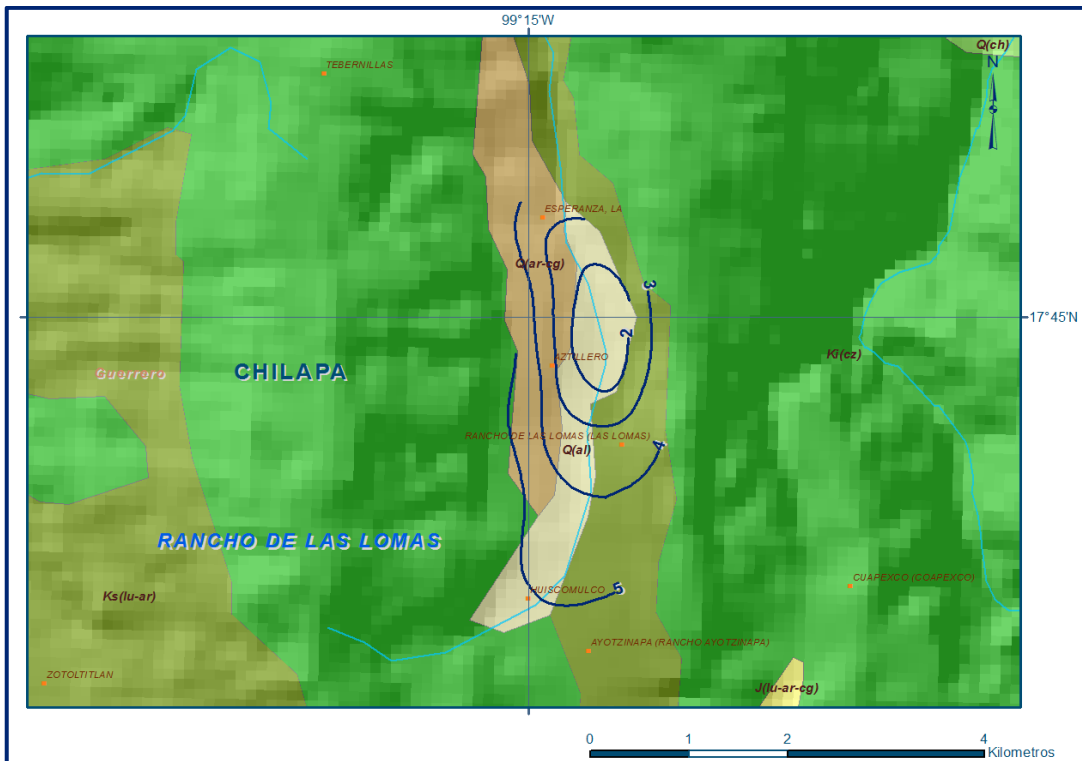


Figura 7. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas Rancho Las Lomas

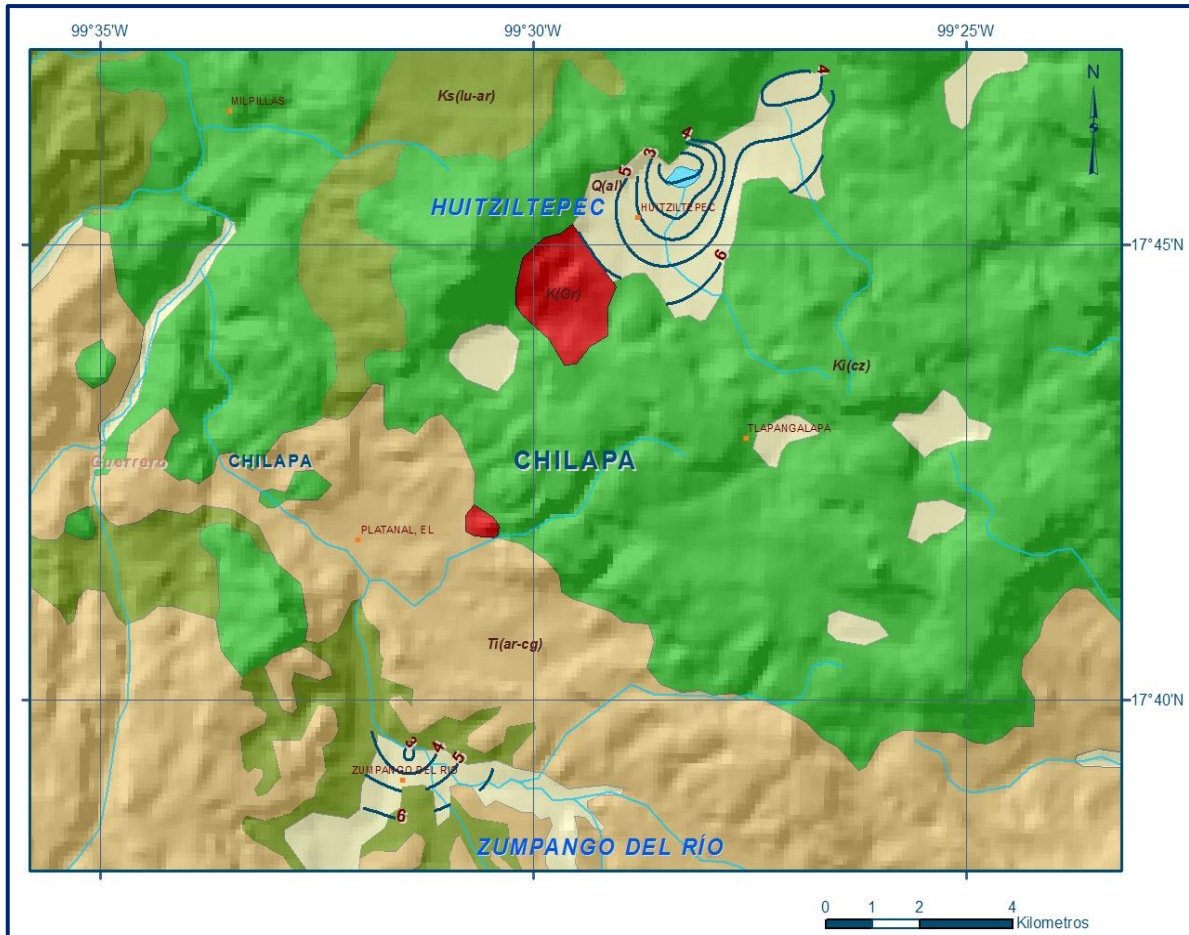


Figura 8. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas Huitziltepec y Zumpango

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo a la elevación del nivel estático para el año 2013, se registran valores de carga hidráulica que varían de 1,000 a 1,830 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 (figuras 9 a 13).

Los valores más bajos se presentan en las zonas de los poblados Zumpango del Río y Chichihualco; en tanto que las elevaciones mayores se registran en las inmediaciones de las comunidades Pantitlán, Chilapa, Zitlala y Rancho Las Lomas.

La dirección preferencial del flujo subterráneo en es general sur-norte, con excepción de las zonas en donde se localizan las comunidades Chichihualco, Pantitlán y una porción de la zona Chilapa-Zitlala, en las que la que la dirección preferencial es este-oeste.

El flujo subterráneo no presenta ninguna deformación o cono de abatimiento que sea causado por la extracción, de tal manera que se observa su condición natural, es decir en dirección de los escurrimientos superficiales.

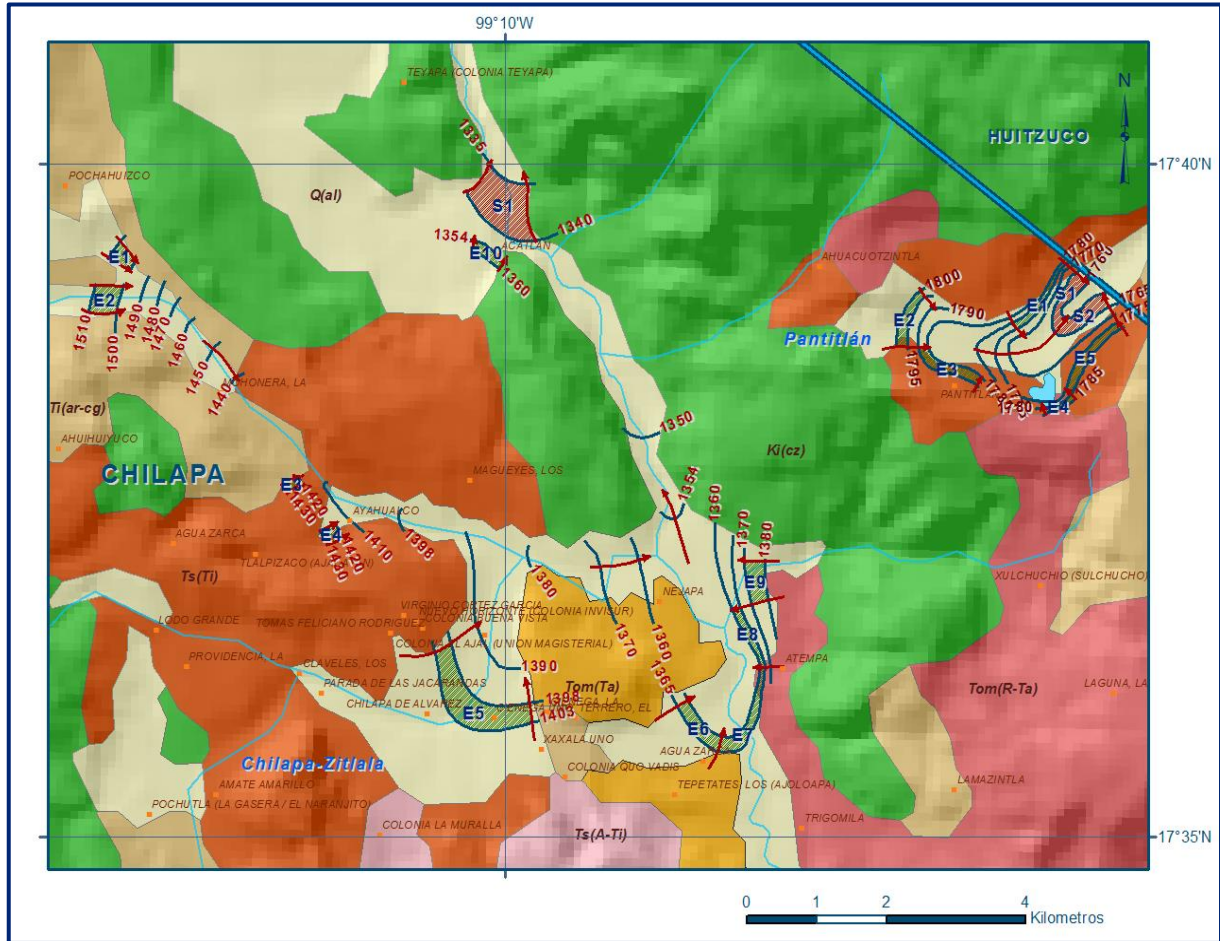


Figura 9. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas Chilapa-Zitlala y Pantitlán

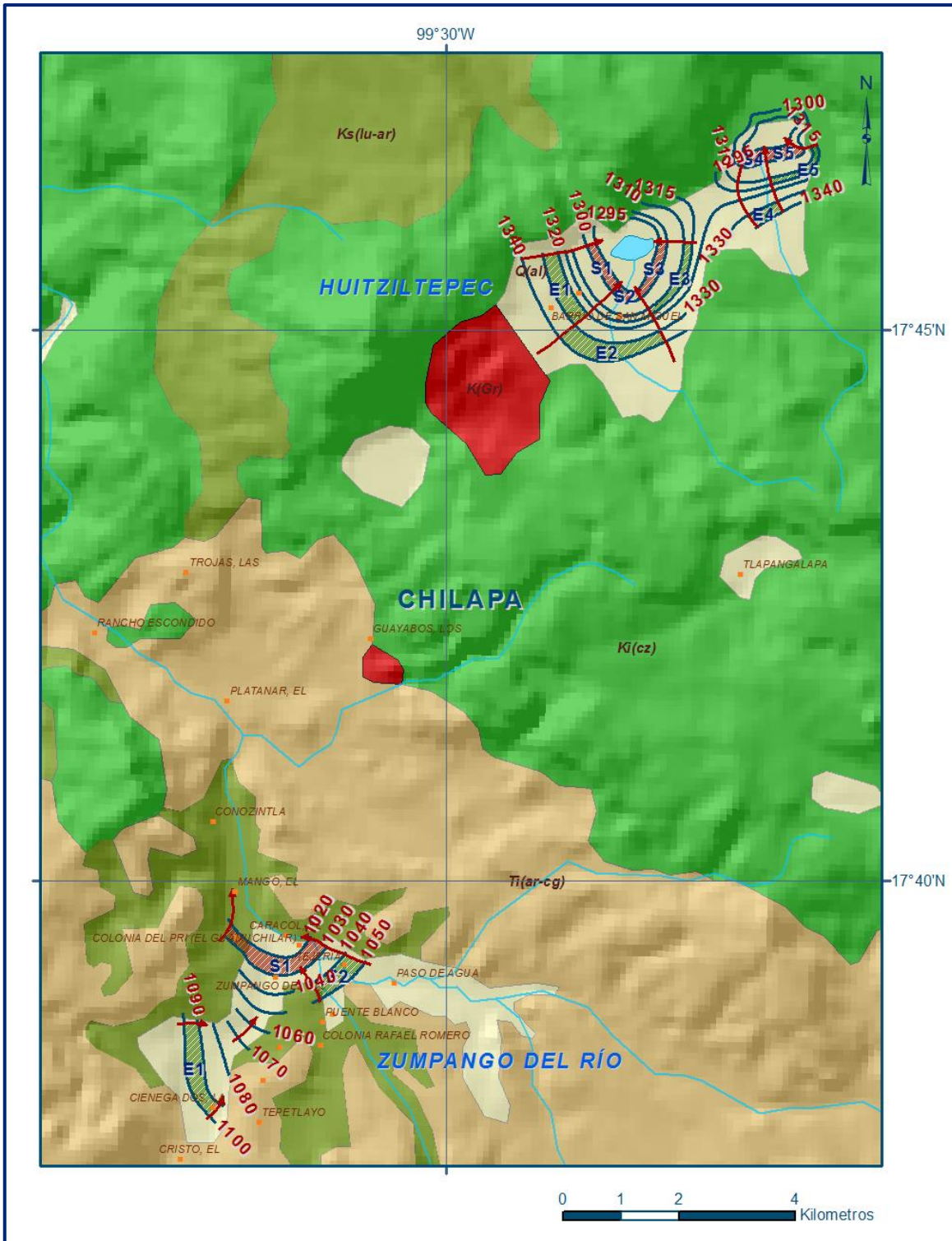


Figura 10. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas Zumpango del Río y Huitziltepec

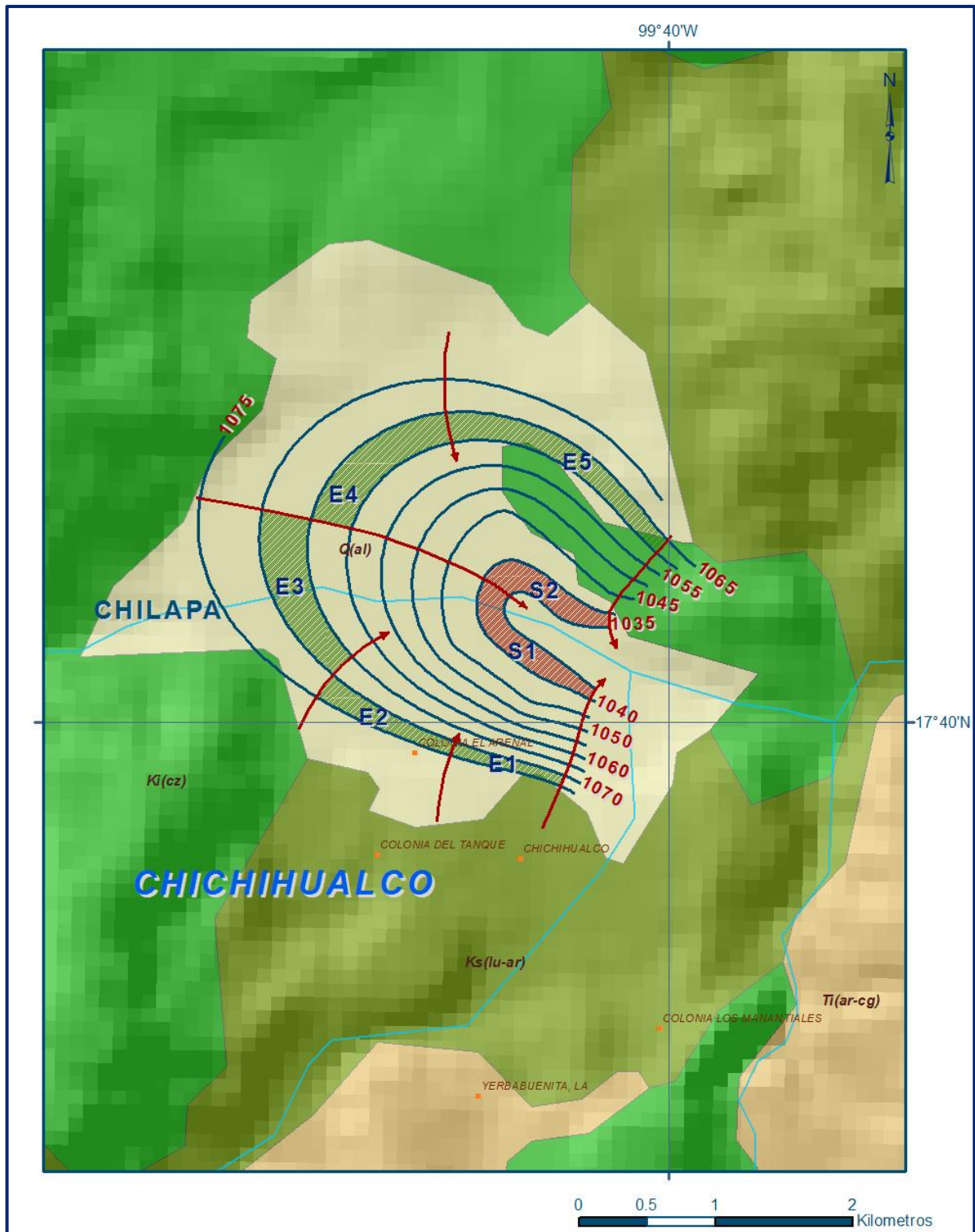


Figura 11. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Chichihualco

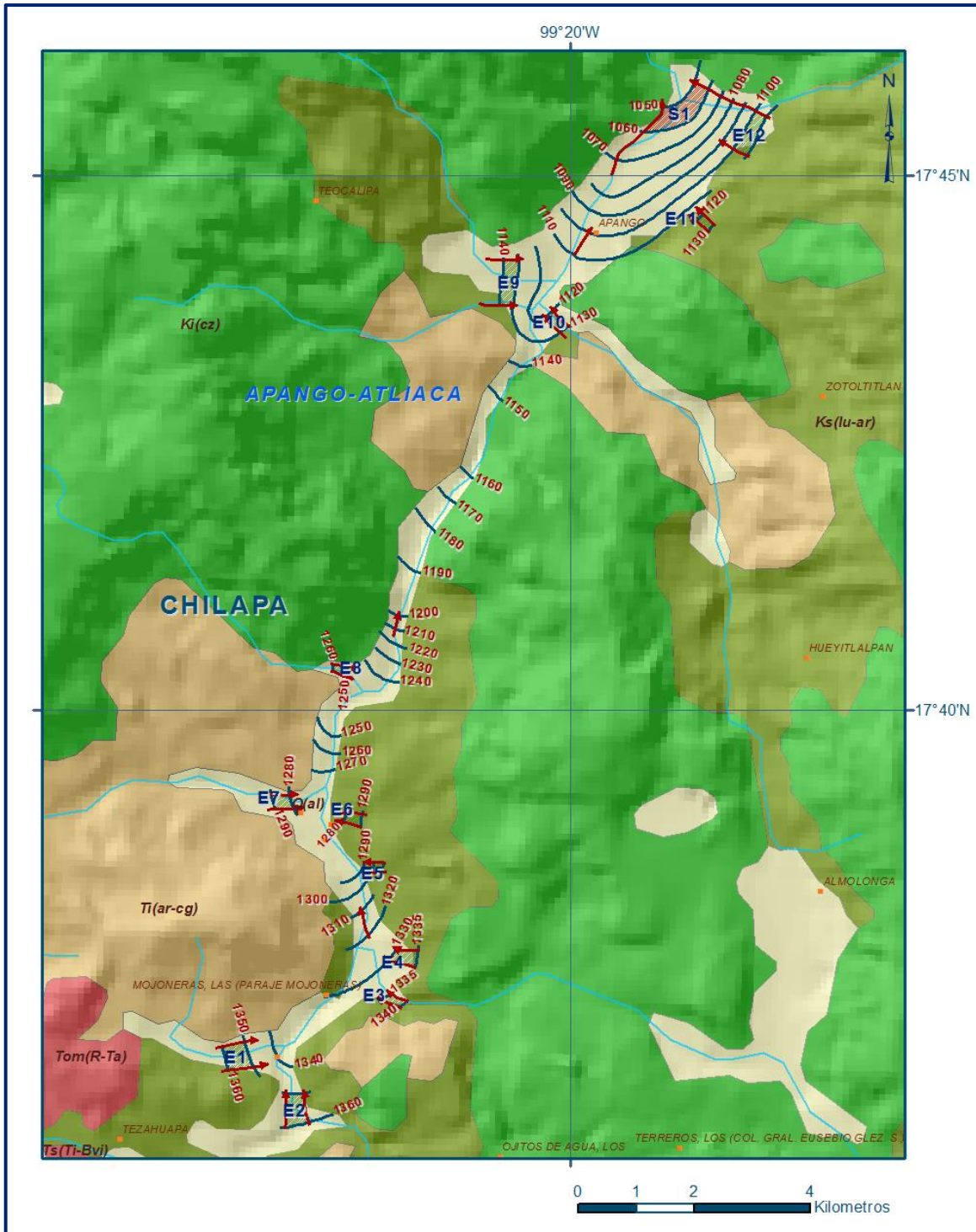


Figura 12. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Apango-Atliaca

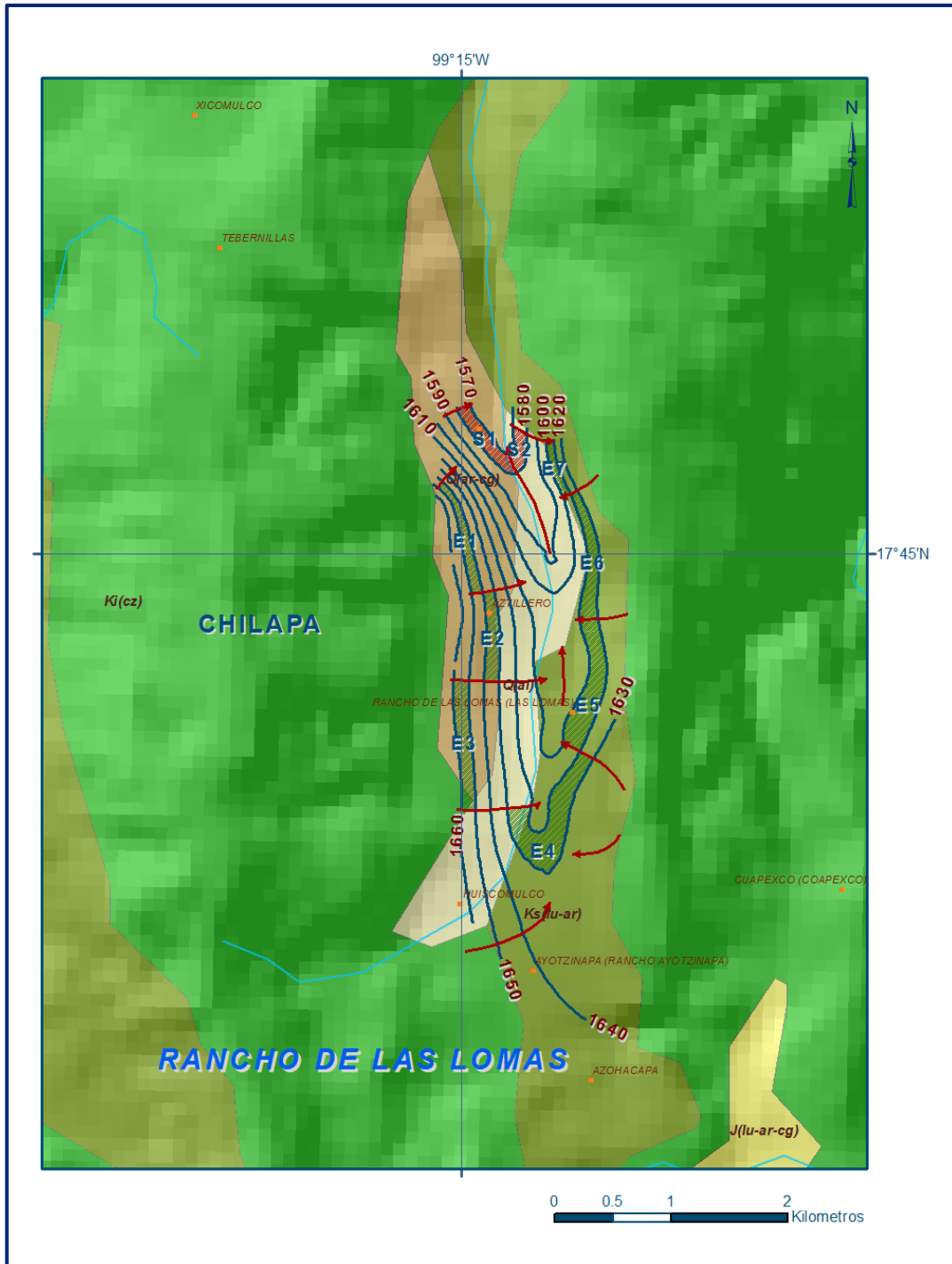


Figura 13. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Rancho Las Lomas

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 2013 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 2013, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en las principales zonas de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente, 10 pozos, 8 norias y 2 manantiales. Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), 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 340 a 1594 mg/lit, siete de las muestras superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l de STD que establece dicha NOM para el agua potable, relacionado con las concentraciones más altas de sulfatos. Los valores de conductividad eléctrica varían de 390 a 1621 $\mu\text{S}/\text{cm}$; el pH entre 7.7 y 8.6, en tanto que la temperatura registrada oscila entre 22.1 y 25.9 °C.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 20 muestras analizadas 9 se clasifican como C_2-S_1 , que representa agua salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, y 11 se clasifican como C_3-S_1 agua de salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable.

Por lo tanto, en general, el agua subterránea es apropiada para su uso en riego agrícola en suelos que presenten buen drenaje y para cultivos moderadamente tolerantes a la salinidad.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica, que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas sedimentarias calcáreas y rocas volcánicas. En menor proporción se presenta la familia sulfatada-cálcica asociada a la existencia de yesos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el 2013, se registró la existencia de 109 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 25 son pozos, 70 norias y 14 manantiales; de ellos, 98 se consideran activos (16 pozos, 68 norias y 14 manantiales) y 11 inactivos (9 pozos y 2 norias).

De las obras activas, 26 se destinan al doméstico, 47 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 19 para uso agrícola y 6 para servicios

El volumen de extracción calculado es de **5.6 hm³ anuales**, de los cuales 3.3 hm³ (58.9%) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las poblaciones, 1.6 hm³ (28.6%) para uso agrícola y 0.5 hm³ (8.9%) para uso doméstico y 0.2 hm³ (3.6%) para servicios.

Adicionalmente, a través de los 14 manantiales se descarga un caudal conjunto de 38 lps, que representa **1.2 hm³ anuales**, que se utilizan para abastecimiento de agua potable.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2013, en una superficie de **82.6 km²** del acuífero, en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos, dividida en 7 áreas: Chichihualco (11.6 km²), Zumpango del Río (5.4 km²), Huitziltepec (10.8 km²), Apango-Atliaca (21.3 km²), Rancho Las Lomas (6.8 km²), Chilapa-Zitlala (22.1 km²) y Pantitlán (4.6 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 definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y de la infiltración de la red de agua potable y de alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Debido a que el valor de la extracción para usos público-urbano y agrícola es pequeño y a que no se utiliza agua superficial para el riego, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que en algunas zonas de balance existe flujo base y no se cuenta con información hidrométrica para estimarlo, su valor se considera la incógnita de la ecuación de balance y la recarga vertical se calculó aplicando el coeficiente de infiltración, obtenido a partir del balance hidrometeorológico, a la superficie de la zona de balance.

Este es el caso de las zonas de balance denominadas Chichihualco, Zumpango, Apango-Atliaca y Chilapa-Zitlala, en las que la ecuación de balance definida es:

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

Para las otras 3 zonas de balance definidas, Huitziltepec, Rancho Las Lomas y Pantitlán, que no tienen flujo base, la recarga vertical es la incógnita de la ecuación:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dfb =** Descarga natural por flujo base;
- Dm:** Descarga a través de manantiales
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

En las zonas de balance Chichihualco, Zumpango, Apango-Atliaca y Chilapa-Zitlala, tomando en cuenta su valor medio de precipitación de 759.3, 727.6, 860.3 y 916.6 mm anuales, respectivamente; y áreas de 11.6, 5.4, 21.3 y 20.2 km², respectivamente, se obtiene un volumen de lluvia de 8.8, 4.0, 18.3 y 20.2 hm³ anuales, también respectivamente. Al aplicar los coeficientes de infiltración obtenidos, 5.8 para las dos primeras zonas, y 6.6 y 12.8 % para Apango-Atliaca y Chilapa-Zitlala, respectivamente, el valor de la recarga vertical Rv es de 0.5, 0.2, 1.2 y 2.6 hm³ anuales, respectivamente, como se muestra en la siguiente tabla:

VARIABLE	ZONA DE BALANCE			
	CHICHIHUALCO	ZUMPANGO	APANGO-ATLIACA	CHILAPA-ZITLALA
Precipitación anual (mm)	759.3	727.6	860.3	916.6
Área acuífera (km ²)	11.6	5.4	21.3	22.1
Volumen precipitado en área acuífera (hm ³ /año)	8.8	4.0	18.3	20.2
Coefficiente de infiltración (%)	5.78	5.78	6.56	12.82
Recarga vertical Rv (hm³/año)	0.5	0.2	1.2	2.6

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del 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 2015, mostrada en las figuras 9 a 13. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

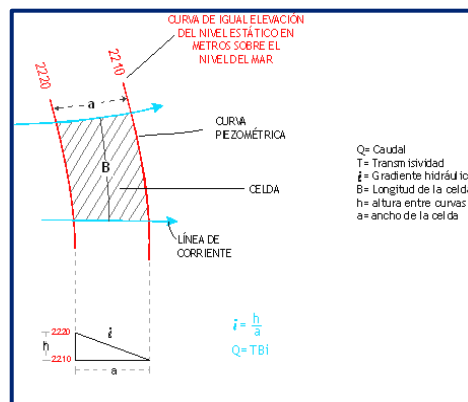
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

B = Largo del canal de flujo (m);

i = Gradiente hidráulico (adimensional);

T = Transmisividad (m^2/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 **18.4 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2013)

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)
ZONA CHICHIHULACO							
E1	801	95	5	0.05263	0.00014	0.0059	0.19
E2	1008	168	5	0.02976	0.00014	0.0042	0.13
E3	1215	269	5	0.01859	0.00014	0.0032	0.10
E4	1141	256	5	0.01953	0.00014	0.0031	0.10
E5	1817	170	5	0.02941	0.00014	0.0075	0.24
						SUBTOTAL	0.75
ZONA ZUMPANGO							
E1	1560	250	10	0.04000	0.00008	0.0050	0.16
E2	855	327	10	0.03058	0.00279	0.0729	2.30
						SUBTOTAL	2.46
ZONA HUITZILTEPEC							
E1	1220	272	10	0.03676	0.00010	0.0045	0.14
E2	1732	265	10	0.03774	0.00010	0.0065	0.21
E3	1389	122	5	0.04098	0.00010	0.0057	0.18
E4	504	220	10	0.04545	0.00010	0.0023	0.07
E5	1089	106	5	0.04717	0.00010	0.0051	0.16
						SUBTOTAL	0.76
ZONA APANGO-ATLIACA							
E1	441	398	10	0.02513	0.00110	0.0122	0.38
E2	349	552	10	0.01812	0.00110	0.0070	0.22
E3	181	309	5	0.01618	0.00110	0.0032	0.10
E4	255	405	10	0.02469	0.00110	0.0069	0.22
E5	178	166	10	0.06024	0.00110	0.0118	0.37
E6	198	288	5	0.01736	0.00110	0.0038	0.12
E7	258	299	5	0.01672	0.00110	0.0047	0.15
E8	163	234	10	0.04274	0.00110	0.0077	0.24
E9	792	241	10	0.04149	0.00110	0.0361	1.14
E10	183	375	10	0.02667	0.00110	0.0054	0.17
E11	159	249	10	0.04016	0.00110	0.0070	0.22
E12	744	230	10	0.04348	0.00110	0.0356	1.12
						SUBTOTAL	4.46
ZONA RANCHO LAS LOMAS							
E1	971	79	10	0.12658	0.00003	0.0037	0.12
E2	754	109	10	0.09174	0.00003	0.0021	0.07
E3	1084	123	10	0.08130	0.00003	0.0026	0.08
E4	1392	164	10	0.06098	0.00003	0.0025	0.08
E5	1115	157	10	0.06369	0.00003	0.0021	0.07
E6	1093	108	10	0.09259	0.00003	0.0030	0.10
E7	478	66	10	0.15152	0.00003	0.0022	0.07
						SUBTOTAL	0.58
ZONA CHILAPA-ZITLALA							
E1	219	337	10	0.02967	0.00033	0.0021	0.07
E2	375	382	10	0.02618	0.00011	0.0011	0.03
E3	129	240	10	0.04167	0.00011	0.0006	0.02
E4	215	231	10	0.04329	0.00011	0.0010	0.03
E5	1846	260	5	0.01923	0.00040	0.0142	0.45
E6	776	190	5	0.02632	0.00213	0.0435	1.37
E7	1361	139	5	0.03597	0.00213	0.1043	3.29
E8	884	95	5	0.05263	0.00070	0.0326	1.03
E9	577	258	10	0.03876	0.00120	0.0268	0.85
E10	482	134	6	0.04478	0.00120	0.0259	0.82
						SUBTOTAL	7.95
ZONA PANTILÁN							
E1	1124	72	5	0.06944	0.00013	0.0101	0.32
E2	815	128	5	0.03906	0.00058	0.0185	0.58
E3	947	127	5	0.03937	0.00013	0.0048	0.15
E4	453	90	5	0.05556	0.00013	0.0033	0.10
E5	1181	100	5	0.05000	0.00013	0.0077	0.24
						SUBTOTAL	1.40
TOTAL ENTRADAS							18.36

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio por zona de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2013, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.2 Salidas

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

7.2.1 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 2013 presentada en las figuras 9 a 13. El valor estimado es de **1.9 hm³/año**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de Salidas por flujo subterráneo (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1143	150	3	0.02000	0.00018	0.0041	0.130
S2	914	160	3	0.01875	0.00018	0.0031	0.097
S3	1790	140	5	0.03571	0.00018	0.0115	0.363
S4	840	175	5	0.02857	0.00021	0.0050	0.159
S5	455	160	5	0.03125	0.00009	0.0013	0.040
S6	980	140	5	0.03571	0.00009	0.0032	0.099
S7	390	230	5	0.02174	0.00009	0.0008	0.024
S8	575	255	5	0.01961	0.00009	0.0010	0.032
S9	1075	415	10	0.02410	0.00009	0.0023	0.074
S10	300	155	10	0.06452	0.00092	0.0178	0.562
S11	640	145	10	0.06897	0.00004	0.0018	0.056
S12	930	650	5	0.00769	0.00004	0.0003	0.009
S13	805	230	5	0.02174	0.0004	0.0070	0.221
S14	745	230	5	0.02174	0.0001	0.0016	0.051
0.0001 TOTAL							1.9

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

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

Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas, Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real.

El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación.

$$ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2 (mm)}{L^2}\right)}}$$

En la que: $L = 300 + 25T + 0.05T^3$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real (mm)

P = Precipitación anual (mm)

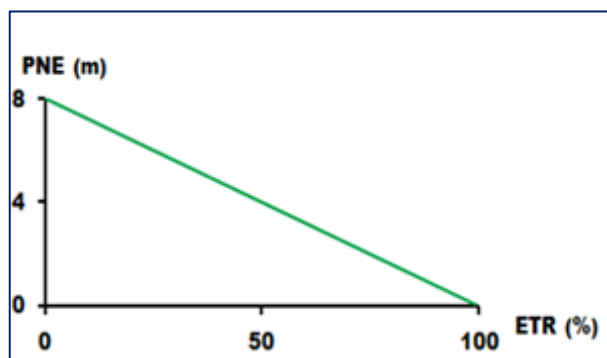
T = Temperatura media anual (°C)

Excepto en la zona de Chichihualco, donde la profundidad al nivel estático es mayor a 30 m, esta componente se presenta en las otras 6 zonas de balance, en las que se registran niveles freáticos someros. La precipitación y temperatura utilizadas son las obtenidas en las normales climatológicas de las estaciones de mayor proximidad a cada área de balance referida.

Considerando para las zonas Zumpango valores medios anuales de temperatura de 24.7°C y precipitación de 727.6 mm, la lámina de ETR que se obtiene es de 697 mm; para la zona Huitziltepec los valores promedio anual de temperatura y precipitación son 22.0 °C y 950.0 mm, respectivamente, con ellos se obtiene una lámina de ETR de 811mm; mientras que para las zonas Apango-Atliaca y Rancho Las Lomas, con los valores de precipitación de 880 mm y temperatura 21.3°, se obtiene una lámina de ETR de 758 mm: por último, para las zonas Chilapa-Zitlala y Pantitlán la lámina de ETR es de 761 mm que se obtiene con los valores promedio de precipitación de 916.6 mm y temperatura 20.4°C.

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 ms para suelos de textura media a gruesa y de 8 m para suelos de textura fina, 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 las indicadas de acuerdo al tipo de suelo, 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 porcentaje de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 y 8 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje de ETR, de tal manera que a 5 y 8 m, dependiendo del suelo, el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100.



De las configuraciones de profundidad al nivel estático, se consideraron las curvas menores e iguales a 8 metros para la zona de Chilapa-Zitlala y de 5 metros para las otras 6 zonas, se calculó el área entre ellas y se tomó el valor promedio (por ejemplo, entre las curvas de 1 y 2 metros en valor promedio será 1.5).

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso, por ejemplo, el valor medio de profundidad de 1.5 metros, se multiplicará por 0.7 ó 0.81 según el caso (que significa que a esta profundidad, el 70 u 81 % es susceptible de evapotranspirarse).

Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 5 u 8 m. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados. En la tabla 3 se muestra el valor de la evapotranspiración real calculado para cada una de las áreas de explotación, el total para el acuífero es de 10.0 hm³/año. **ETR = 10.0 hm³/año**

7.2.3 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo realizado en 2013, se identificó la existencia de 14 pequeños manantiales dentro de la zona, que en conjunto descargan 38 lps, es decir un volumen estimado de **1.2 hm³/anuales**, distribuidos de la siguiente manera: 0.6 hm³ en Chichihualco, 0.2 hm³ en Zumpango, 0.3 hm³ en Apango-Atliaca y 0.1 hm³ en Chilapa-Zitlala.

7.2.4 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **5.6 hm³/año**, distribuidos de la siguiente manera: 0.2 hm³ en Chichihualco, 1.5 hm³ en Zumpango, 0.5 hm³ en Huitziltepec, 0.2 hm³ en Apango-Atliaca, 0.2 hm³ en Rancho Las Lomas, 1.7 hm³ en Chilapa-Zitlala y 1.3 hm³ en Pantitlán.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración (2013)

INTERVALO CURVAS (m)	PROFUNDIDAD CONSIDERADA (m)	ÁREA (km ²)	PORCENTAJE (%)	LÁMINA DE ETR (m)	VOLUMEN DE ETR (hm ³ /año)
ZONA ZUMPANGO					
0 A 1	0.5	0.00	90	0.697	0.00
1 A 2	1.5	0.00	70	0.697	0.00
2 A 3	2.5	0.06	50	0.697	0.02
3 A 4	3.5	0.74	30	0.697	0.15
4 A 5	4.5	1.02	10	0.697	0.07
		1.82			0.24
ZONA HUITZILTEPEC					
0 A 1	0.5	0.16	90	0.811	0.12
1 A 2	1.5	0.33	70	0.811	0.19
2 A 3	2.5	0.69	50	0.811	0.28
3 A 4	3.5	1.17	30	0.811	0.28
4 A 5	4.5	4.05	10	0.811	0.33
					1.20
ZONA APANGO-ATLIACA					
0 A 1	0.5	0.00	90	0.758	0.00
1 A 2	1.5	0.00	70	0.758	0.00
2 A 3	2.5	0.00	50	0.758	0.00
3 A 4	3.5	17.36	30	0.758	3.95
4 A 5	4.5	3.30	10	0.758	0.25
					4.20
ZONA RANCHO DE LAS LOMAS					
0 A 1	0.5	0.00	90	0.758	0.00
1 A 2	1.5	0.00	70	0.758	0.00
2 A 3	2.5	1.05	50	0.758	0.40
3 A 4	3.5	1.87	30	0.758	0.42
4 A 5	4.5	3.64	10	0.758	0.28
					1.10
ZONA CHILAPA-ZITLALA					
0 A 1	0.5	0.00	94	0.761	0.00
1 A 2	1.5	1.32	81	0.761	0.82
2 A 3	2.5	0.52	69	0.761	0.27
3 A 4	3.5	0.47	56	0.761	0.20
4 A 5	4.5	0.54	44	0.761	0.18
5 A 6	5.5	0.77	31	0.761	0.18
6 A 7	6.5	1.84	19	0.761	0.26
7 A 8	7.5	3.54	6	0.761	0.17
					2.08
ZONA PANTITLÁN					
0 A 1	0.5	0.00	90	0.761	0.00
1 A 2	1.5	0.35	70	0.761	0.19
2 A 3	2.5	1.07	50	0.761	0.41
3 A 4	3.5	2.33	30	0.761	0.53
4 A 5	4.5	0.34	10	0.761	0.03
					1.16
SUMA					9.98

7.2.5 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

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 el flujo base en las zonas Chichihualco, Zumpango, Apango-Atliaca y Chilapa-Zitlala, en las que la ecuación de balance definida es:

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

Zona Chichihualco:

$$Dfb = 0.0 + 0.5 + 0.7 - 0.2 - 0.2 - 0.6 - 0.0$$

$$Dfb = 0.2$$

Zona Zumpango:

$$Dfb = 0.0 + 0.2 + 2.5 - 0.4 - 1.5 - 0.2 - 0.2$$

$$Dfb = 0.4$$

Zona Apango-Atliaca:

$$Dfb = 0.0 + 1.2 + 4.5 - 0.7 - 0.2 - 0.3 - 4.2$$

$$Dfb = 0.3$$

Zona Chilapa-Zitlala:

$$Dfb = 0.0 + 2.6 + 7.9 - 0.1 - 1.7 - 0.1 - 2.1$$

$$Dfb = 6.5$$

Para las zonas Huitziltepec, Rancho Las Lomas y Pantitlán la incógnita es la recarga vertical y se obtuvo de la siguiente expresión:

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

Zona Huitziltepec:

$$Rv = 0.3 + 0.5 + 1.2 + 0.0 - 0.8$$

$$\mathbf{Rv = 1.2}$$

Zona Rancho Las Lomas:

$$Rv = 0.1 + 0.2 + 1.1 + 0.0 - 0.6$$

$$\mathbf{Rv = 0.8}$$

Zona Pantitlán:

$$\mathbf{Rv = 0.1 + 1.3 + 1.2 + 0.0 - 1.4}$$

$$\mathbf{Rv = 1.2}$$

Por lo tanto, la Rv total de las 7 zonas de balance es:

$$Rv = 0.5 + 0.2 + 1.2 + 2.6 + 1.2 + 0.8 + 1.2 \quad \mathbf{Rv = 7.7}$$

Y la recarga total (Rt) es igual a:

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$

$$\mathbf{R = 7.7 + 18.4}$$

$$\mathbf{R = 26.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **26.1 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 particular, se considera una descarga comprometida de **8.6 hm³/anuales**, de los cuales corresponden al flujo base y a la descarga a través de manantiales. No se considera comprometido el volumen de las salidas por flujo subterráneo horizontal porque éstas ocurren dentro del acuífero.

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 **5,859,809 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 26.1 - 8.6 - 5.859809 \\ \text{DMA} &= 11.640191 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **11,640,191 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Tlapa-Huamuxtlán, Poloncingo, Buenavista de Cuéllar y Tlacotepec, en el Estado de Guerrero. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C. V. (SIIDSA).

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Chilapa, Altamirano-Cutzamala, Arcelia, Paso de Arena y Coahuayutla, en el Estado de Guerrero. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C. V. (SIIDSA).

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1987. Estudio Geológico-Estructural y de Prospección Geohidrológica en la Zona de Iguala-Cocula, Estado de Guerrero. Realizado Exploraciones y Estudios Geológicos, Geotécnicos