



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CUICATLÁN (2012), ESTADO DE
OAXACA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	6
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	7
3	FISIOGRAFIA	8
3.1	Provincias fisiográficas.....	8
3.2	Clima.....	9
3.3	Hidrografía.....	11
3.4	Geomorfología.....	11
4	GEOLOGIA.....	12
4.1	Estratigrafía	13
4.2	Geología estructural	20
4.3	Geología del subsuelo	22
5	HIDROGEOLOGIA	23
5.1	Tipo de acuífero	23
5.2	Parámetros hidráulicos	24
5.3	Piezometría	24
5.4	Comportamiento hidráulico	25
5.4.1	Profundidad del nivel estático.....	25
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	25
5.4.3	Evolución del nivel estático	25
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	29
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	30
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	30
7.1	Entradas	30
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	31
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	31
7.2	Salidas	32
7.2.1	Bombeo (B)	33
7.2.2	Evapotranspiración (ETR).....	33
7.2.3	Descarga a través de manantiales (Dm).....	34
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS)	34
8	DISPONIBILIDAD.....	36
8.1	Recarga total media anual (R)	36
8.2	Descarga natural comprendida (DNC)	36
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	37
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	37
9	BIBLIOGRAFÍA.....	38

1 GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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

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

1.1 Localización

El acuífero Cuicatlán, definido con la clave 2012 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del estado de Oaxaca, en el límite con el estado de Puebla, entre los paralelos 17°06'16" y 18°12'13" de latitud norte y los meridianos 96°21'50" y 97°30'57" de longitud oeste, comprendiendo una superficie de 7,451 km².

Limita al norte con el acuífero Valle de Tehuacán, perteneciente al estado de Puebla; al este con Tuxtepec, al sur con Valles Centrales, al suroeste con Nochixtlán, al oeste con Tamazulapan y al noroeste con Huajuapán de León todos ellos pertenecientes al estado de Oaxaca (Figura 1).

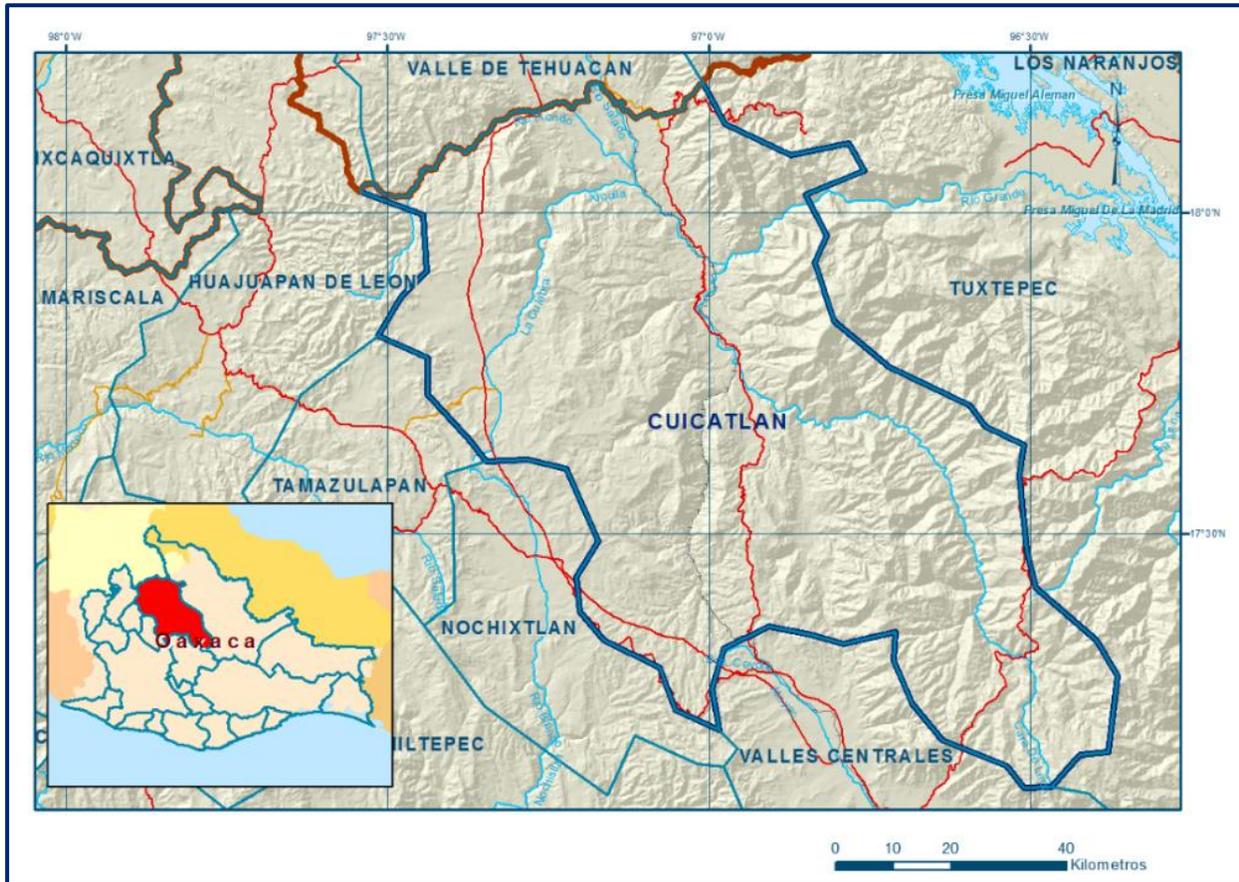


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie que cubre totalmente los municipios Teotitlán de Flores Magón, San Antonio Nanahuatipam, Tepelmeme Villa de Morelos, San Martín Toxpalán, Huautepéc, Mazatlán Villa de Flores, Santa María Tecomavaca, San Juan Bautista Cuicatlán, Santa María Ixcatlán, San Miguel Tequixtepec, Santos Reyes Pápalo, San Mateo Tlapiltepec, Valerio Trujano, Santiago Tepetlapa, San Juan Bautista Coixtlahua, San Pedro Jocotipac, San Miguel Huautla, Santa María Texcatitlán, San Pedro Jaltepetongo, Santiago Apoala, San Juan Bautista Atlatlahuca, Santa María Apazco, Santa María Nativitas, San Miguel Chichahua, Santiago Nacaltepec, San Pedro Coxcaltepec Cantar, San Pablo Macuiltianguis, San Cristóbal Suchixtlahuaca, Abejones, Santiago Huaucilla, San Jerónimo Sosola, San Juan Bautista Jayacatlán, San Miguel Aloapam, San Juan Atepec, Santa Ana Yareni, San Juan Evangelista Analco, Santa María Jaltianguis, San Miguel del Río, San Juan Chicomezuchil, Santiago Xiacui, Santa Catarina Lachatao, Santa María Yavesia, San Juan de los Cués.

De manera parcial comprende los municipios Huautla de Jiménez, San Lucas Zoquiapam, Concepción Buenavista, Cuyamecalco Villa de Zaragoza, San Francisco

Teopan, Santiago Ihuitlán Plumas, Concepción Pápalo, Tlacotepec Plumas, Santa Maria Pápalo, Santa Magdalena Jicotlán, San Juan Tepeuxila, San Miguel Tulancingo, San Juan Quiotepec, Santiago Comaltepec, San Pedro Yolox, Ixtlán de Juárez, San Bartolo Soyaltepec, Asunción Nochixtlán, San Francisco Telihtlahuaca, San Juan del Estado, Teococuilco de Marcos Pérez, Santiago Tenango, San Pablo Huitzo, Magdalena Jaltepec, Capulalpam de Méndez, Santa Catarina Ixtepeji, Nuevo Zoquiapam, San Miguel Amatlán, Santa Catarina Zapoquila y Santiago Suchilquitongo.

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 2012 CUICATLAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	31	16.0	18	2	44.9	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	97	0	32.3	18	12	12.5	
3	96	58	30.6	18	8	17.0	
4	96	52	22.2	18	5	23.9	
5	96	46	54.9	18	6	32.5	
6	96	45	27.5	18	3	54.8	
7	96	50	56.5	18	1	44.6	
8	96	49	0.0	17	57	51.5	
9	96	50	6.8	17	55	20.7	
10	96	48	17.2	17	49	55.1	
11	96	43	10.4	17	45	38.1	
12	96	35	39.7	17	42	2.2	
13	96	34	8.9	17	40	0.5	
14	96	30	34.7	17	38	21.1	
15	96	31	0.4	17	35	28.0	
16	96	30	20.8	17	28	30.4	
17	96	29	28.5	17	24	56.4	
18	96	23	47.9	17	20	5.8	
19	96	21	49.8	17	16	41.8	
20	96	22	43.4	17	9	38.6	
21	96	25	20.2	17	9	23.0	
22	96	28	2.0	17	6	23.7	
23	96	30	36.7	17	6	16.2	
24	96	32	13.0	17	8	20.5	
25	96	38	13.4	17	10	46.2	
26	96	40	59.9	17	14	10.8	
27	96	42	45.8	17	18	11.6	
28	96	42	36.9	17	20	51.0	
29	96	47	29.5	17	19	45.0	
30	96	50	28.5	17	20	34.4	
31	96	54	25.8	17	21	19.6	
32	96	58	35.9	17	19	16.3	
33	96	59	40.9	17	15	31.3	
34	96	58	59.7	17	11	41.3	
35	97	3	7.4	17	13	33.3	
36	97	4	37.0	17	17	30.8	
37	97	9	46.9	17	20	3.5	
38	97	12	3.0	17	22	44.7	
39	97	12	21.4	17	26	1.3	
40	97	10	20.9	17	29	19.2	
41	97	13	22.4	17	36	6.8	
42	97	16	54.4	17	36	55.4	
43	97	20	49.7	17	36	47.0	
44	97	22	23.5	17	38	48.3	
45	97	26	14.5	17	43	2.9	
46	97	26	18.7	17	46	26.5	
474	97	30	56.7	17	48	29.7	
48	97	28	38.9	17	52	17.2	
49	97	26	19.5	17	54	30.2	
50	97	26	42.0	17	59	49.1	
51	97	32	33.1	18	1	59.5	
1	97	31	16.0	18	2	44.9	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Río Papaloapan instalado el 16 de junio de 2000. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; casi la totalidad de él está sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero está vigente en la porción sur y es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Oaxaca, cuya extensión y límites geopolíticos comprenden los ex distritos de Etla, Centro, Tlacolula, Zimatlán y Ocotlán, Oax.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 25 de septiembre de 1967; esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El segundo decreto rige en la mayor parte de la superficie del acuífero y es el *“Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuacultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales”*, publicado en el DOF, el 6 de agosto de 1973; esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Sólo en pequeñas áreas del extremo sur no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada está 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.

El uso principal del agua subterránea es el doméstico. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de

disponibilidad 4. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha el comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

Toda la porción central y noroccidental del acuífero pertenece al Área Natural Protegida denominada “Tehuacán-Cuicatlán”, decretada el 18 de septiembre de 1988.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación de cobertura regional, entre los más importantes y recientes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL RÍO PAPALOAPAN, LOCALIZADOS EN LOS ESTADOS DE VERACRUZ, OAXACA Y PUEBLA. Realizado en 2005 para la Comisión Nacional del Agua Gerencia Regional Golfo Centro, por Consorcio de Ingeniería Mexicana, S.A. de C.V. Su objetivo general fue conocer la condición geohidrológica de los acuíferos, así como contar con información necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y calcular su disponibilidad. Mediante actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría, nivelación de brocales, pruebas de bombeo y toma de muestras para análisis fisicoquímicos, plantea el balance de aguas subterráneas para determinar su disponibilidad.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LOS ACUÍFEROS CUICATLÁN, COATZACOALCOS, EN EL ESTADO DE OAXACA; JALAPA-COATEPEC, TECOLUTLA Y ÁLAMO-TUXPAN, EN EL ESTADO DE VERACRUZ, elaborado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, CENSO E HIDROMETRÍA DEL ACUÍFERO CUICATLÁN, OAXACA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, el censo de aprovechamientos y la hidrometría de las extracciones.

3 FISIOGRAFIA

3.1 Provincias fisiográficas

El acuífero Cuicatlán se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur (Raisz, 1964). Por otra parte, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI (1990), pertenece a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur; la porción central en la Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca, la región oriental en la Subprovincia Sierras Orientales y una superficie menor de la zona occidental se localiza en la Subprovincia Mixteca Alta

La Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja y se encuentra constituida por una serie de montañas que se extienden a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2500 msnm. Está orientada de manera paralela a la costa del Océano Pacífico, separada del Eje Neovolcánico por la Depresión del Balsas.

La Subprovincia Sierras Centrales es una región paralela la mitad norte de la subprovincia Sierras Orientales, inicia desde Tehuacán, Puebla, y finaliza hasta la sierra situada al oeste de la ciudad de Oaxaca. Comprende el 7.48% de la superficie del estado de Oaxaca. En la parte norte, dentro del estado de Puebla, es conocida como sierra de Zapotitlán, en la que dominan las rocas calizas del Cretácico, que originan cumbres tendidas cuyas elevaciones son mayores a 2,000 msnm. Hacia el sur, presenta afloramientos de rocas metamórficas, con abundancia de gneis, donde las laderas son escarpadas.

La Subprovincia Sierras Orientales forma el extremo oriental de la provincia Sierra Madre del Sur y comprende parte de los estados de Puebla, Veracruz y Oaxaca; se extiende en dirección noroeste-sureste desde la región de Orizaba, Veracruz, hasta las proximidades de Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. Abarca el 28.1% de la

superficie de Oaxaca y corresponde a la zona conocida regionalmente como Sierra Madre de Oaxaca.

La Subprovincia Mixteca Alta abarca el 6.97% del territorio del estado de Oaxaca, está orientada en dirección norte-sur y se adentra en territorio del estado de Puebla; tiene una geología muy compleja conformada por rocas sedimentarias calizas, volcánicas y metamórficas

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región presenta varios tipos. Predominan los climas; semiáridos en sus variantes cálido, semicálido y templado (BS1(h')w, BS1hw y BS1kw), así como los áridos cálidos y semicálidos (BS0(h')w, BS0hw), los cuales cambian lateralmente, hacia las zonas de mayor elevación topográfica en donde se registran climas fríos, de tipo C. En el oriente de la cañada se presentan climas semicálidos húmedos y subhúmedos ((A)C(m), (A)C(w2)).

El tipo BS1kw(w), que es el menos seco de los secos. El subtipo es semiseco (l), el cual presenta un grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido. Presenta una temperatura media anual entre 12 y 18° C, la media del mes más frío entre -3 y 18° C y la del más cálido mayor de 18° C. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año indicando la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, es de verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es menor que 5.

En el clima BS0kw(w), el subtipo (o) indica que es seco, pues su grado de humedad es menor de 22.9. La condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido. Presentan una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la media mes más frío entre -3 y 18 °C y la del más cálido > 18 °C. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año indicando la temporada en la que se concentra la mayor

cantidad, es de verano. Esto significa que el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es menor que 5

En las zonas topográficamente más altas el clima es templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menos de 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5 al 10.2% del total anual.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de enero a marzo, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, junio es el mes más cálido, en tanto que los meses de enero y diciembre registran la menor temperatura media.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de la red de estaciones que tienen influencia en el área de explotación del acuífero, cuyo registro comprende el periodo, 1980-2013. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración real de **866.9 mm, 25.9 °C y 2100 mm**, respectivamente.

Debido a la gran extensión del acuífero, a la gran diferencia de altitudes y el número de estaciones ubicadas, para la determinación de las variables climatológicas sólo se tomó en cuenta la información de las 9 estaciones que tienen influencia en el área de explotación del acuífero: Calapilla, Xiquila, Quiotepec, San Juan B. Cuicatlán, Domingullo, Atatlahuca, San Juan Tepeuxila, San Pedro Jocotipac y Santiago Nacaltepec, cuyo registro comprende el periodo, 1980-2015. Con estos datos se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración real **866.9 mm, 25.9 °C y 2100 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se localiza en la Región Hidrológica número 28 (RH 28) "Papaloapan", Subregión Hidrológica Río Papaloapan, en la cuenca del mismo nombre, subcuencas de los ríos Quiotepec, Salado y Blanco. La Región Hidrológica Papaloapan se localiza en la porción noroccidental del estado de Oaxaca, en su límite con estado de Puebla, y la porción sur del estado de Veracruz; está integrada por las cuencas de los ríos Actopan, La Antigua, Jamapa y Papaloapan, que desembocan en el Golfo de México. El acuífero Cuicatlán comprende la porción suroriental de región hidrológica, cuyos principales ríos tienen su origen en los límites entre los estados de Veracruz y Oaxaca, hasta su desembocadura en el Golfo de México.

La cuenca del Río Papaloapan está dividida en tres zonas: La Cañada o Alto Papaloapan, Medio Papaloapan y Bajo Papaloapan. De acuerdo con esta división, el acuífero se encuentra ubicado en su mayor parte en la subcuenca Medio Papaloapan.

El Río Papaloapan nace en las inmediaciones de Coajimoloyas, en la Sierra Juárez, tomando una dirección general hacia el NW con el nombre de Río Grande, recibe las aportaciones de los ríos Las Vueltas, Tomellín, Apoala y San Pedro, labrando el cañón de Tomellín. En la porción suroriental del acuífero existe una serie de vertientes del Río Grande, que confluyen en la corriente principal del río Salado; en tanto que al noroeste los tributarios más importantes son los Río Hondo y Xiquila. El tipo de drenaje que predomina en la región es el dendrítico.

Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado bien desarrollado y en menor proporción subparalelo. Los escurrimientos son de tipo intermitente y sólo los ríos más importantes son perennes, que mantienen un caudal base importante durante el estiaje. En el territorio del acuífero no existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial.

3.4 Geomorfología

En la superficie del acuífero las elevaciones topográficas varían de 60 y 1700 msnm. Las mayores elevaciones se localizan en la porción sur, conformado sierras plegadas que presentan drenaje radial y conforman cimas escarpadas. Se distinguen geformas de sierras bajas de mediana altura con elevaciones hasta de 1700 msnm, orientadas en sentido sureste –suroeste, de forma alargada y angosta. En la porción

noroccidental y central del acuífero existen llanuras y lomeríos con pendientes suaves a moderadas que favorecen la formación de meandros en los ríos, lagunas y zonas de inundación.

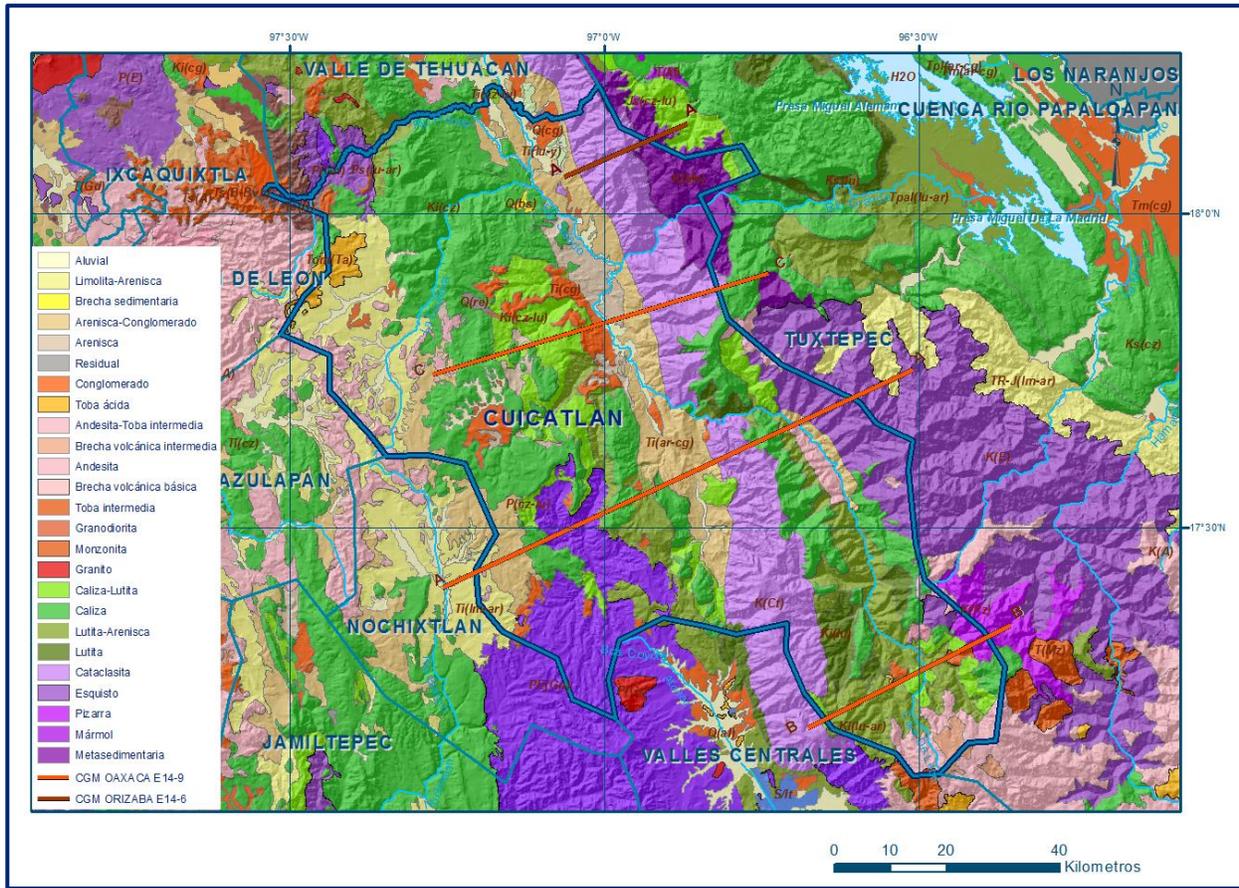
Desde el punto de vista geomorfológico, se pueden distinguir 4 unidades: Laderas de Montaña: distribuidas casi en la totalidad del área del acuífero, sobre todo en los sectores meridional, occidental y oriental. Está conformada por rocas calcáreas y calcáreo-arcillosas, secuencias vulcanosedimentarias y rocas metamorizadas, que forman crestas y cumbres altas y escarpadas, con patrones de drenaje subparalelo y paralelo. Sus cumbres y montañas generalmente se encuentran orientadas en dirección NW-SE, con elevaciones medias de 2200-2500 msnm y altura relativa 1200 m, en tanto que en su sector occidental es de 2800 a 3200 msnm, con alturas relativas de 1600 m a 2200 m.

Cerros y lomeríos altos: aparecen de manera aislada en las porciones centro, norte y sur occidental del acuífero, comprende materiales areno-arcillosos y volcánicos (flujos de lava andesítica), y depósitos de conglomerados. Presenta drenaje paralelo y dendrítico y alturas relativas de 400 m, con elevaciones de 2200 a 2500 msnm. Cerros y lomeríos bajos: ubicados en las porciones septentrional y centro occidental del área del acuífero, constituidos por paquetes de conglomerados y depósitos piroclásticos acumulados en los pies de monte; así como paquetes de calizas, lutitas y areniscas. Presenta drenaje dendrítico a sub-paralelo y elevaciones relativas de 200 m con altitudes de 1700 a 2200 msnm. Por último, las planicies aluviales tienen una distribución restringida y están, constituidas por materiales aluviales y depósitos de pie de monte; se presentan en la porción central del área, con altitudes de 800 a 1500 msnm

4 GEOLOGIA

El acuífero se localiza en la porción sur de México que se caracteriza por su gran complejidad tectónica y estructural, debido a la presencia de los complejos metamórficos Oaxaca y Acatlán, que se encuentran yuxtapuestos por fallas de desplazamiento lateral. Estos complejos metamórficos desarrollaron cubiertas sedimentarias diferentes. La geología de la región se asocia a los Terrenos Tectonoestratigráficos: Mixteco, Oaxaca y Maya (Campa y Coney, 1983), cuyas cubiertas sedimentarias mesozoicas abarcan parte de las cuencas mesozoicas de Tlaxiaco, Cuicateca y Zongolica. La delimitación del Terreno Oaxaca a través de zonas de cizalla con los terrenos Mixteco y Maya, define zonas de debilidad que sufrieron reactivaciones en diferentes tiempos geológicos, actuando como fallas de

desplazamiento lateral o bien como fallas normales, de las cuales esta última se considera que contribuyó en la configuración de la denominada Cañada Oaxaqueña. Las carpetas sedimentarias depositadas manifiestan una clara influencia de los bloques del basamento, elementos estables que controlaron la sedimentación y el estilo de deformación estructural que prevalece en la zona (Figura 2).



4.1 Estratigrafía

En la superficie que cubre el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuyo registro estratigráfico comprende del Precámbrico al Reciente. Superficialmente, la columna estratigráfica de la región presenta cambios notables en función del bloque estructural a que pertenezca, de tal forma la diversidad de rocas puede corresponder con ambientes continentales y marinos, así como las derivadas de procesos de metamorfismo. A continuación, se describen las rocas expuestas en la región, de la unidad más antigua a la más reciente.

Terreno Mixteco

El basamento del Terreno Mixteco fue definido por Ortega-Gutiérrez (1978) como Complejo Acatlán de edad Cámbrico Superior al Ordovícico y está dividido en los subgrupos Petlalcingo y Acateco, constituidos por esquistos psamíticos y pelíticos, migmatitas, metaconglomerados y metacalizas. La cobertura de este terreno está compuesta de conglomerados, areniscas y lutitas de la Formación Olinalá de edad Carbonífero-Pérmico. Discordantemente a esta formación, afloran areniscas, lutitas y conglomerados que constituyen las formaciones Rosario y Cualác indiferenciadas del Jurásico Inferior, que son cubiertas por una secuencia de areniscas y lutitas que comprenden el Grupo Tecocoyunca del Jurásico Medio, que subyace a calizas, lutitas, limolitas y tobas andesíticas que conforman las formaciones Chimeco, Sabinal y una unidad denominada Indiferenciado del Jurásico Superior.

Durante el Neocomiano-Aptiano se deposita una secuencia de calizas y lutitas de la Formación Tlaxiaco, la cual es cubierta en el Albiano por yesos y dolomías de la Formación San Juan Teita, marcando el inicio de una plataforma carbonatada que evoluciona hasta el Cenomaniano y está representada por calizas de la Formación Teposcolula, que a su vez es sobreyacida por margas y limolitas de la Formación Tilantongo, del Turoniano-Maestrichtiano.

Terreno Oaxaca

Limitado al poniente tectónicamente por el Terreno Mixteco y al oriente por el Terreno Maya. Su basamento está constituido por el Complejo Oaxaqueño (Ortega-Gutiérrez, 1984), compuesto por charnoquitas, ortogneis, paragneis, gneis sienítico, gneis anortosítico, nelsonitas, migmatitas y mármoles. Este complejo presenta grado de metamorfismo de facies de granulita, con edades que varían de 1,000 a 1,200 Ma (Anderson y Silver, 1971). La cobertura propia del Complejo Oaxaqueño comprende calizas, lutitas y areniscas de la Formación Tiñú del Cámbrico-Ordovícico Inferior, sobre la cual descansa de manera discordante una secuencia de lutitas, areniscas y calizas de las formaciones Ixtaltepec (Mississípico-Pérmico) y Santiago (Pensilvánico, a estas formaciones le sobreyacen los conglomerados rojos de la Formación Yododeñe, del Pérmico-Triásico.

Sobreyace discordantemente una secuencia de lechos rojos de la Formación Todos Santos del Jurásico Medio, sobre la cual descansan discordantemente las areniscas y lutitas con lentes calcáreos de la Formación Jaltepetongo del Neocomiano-Aptiano, a la que le sobreyace concordantemente las calizas con bandas de pedernal negro de la Formación Yushe del Albiano-Cenomaniano. El Cretácico Superior comprende calizas y lutitas de la Formación Yucuyama.

Terreno Maya

Está limitado al poniente tectónicamente por el Terreno Oaxaca. Su basamento está constituido por el Complejo Metamórfico Sierra de Juárez que comprende rocas metamórficas en facies de esquistos verdes como son esquistos de cuarzo-muscovita, esquistos de cuarzo-biotita, esquistos de actinolita-tremolita, así como metaareniscas, metaconglomerados y metacalizas. La edad de esta unidad es aún discutible ya que existen dataciones radiométricas del Carbo-Pérmico, aunque también existen algunas edades mesozoicas. En función de que está afectado parcialmente por un granito-granodiorita de supuesta edad pérmica, se asume una edad Carbo-Pérmico para el complejo metamórfico.

El Complejo Milonítico Aloapan compuesto de rocas de metamorfismo cataclástico de cizalla, consta de protomilonitas, milonitas, ultramilonitas y cataclasitas. Estas rocas están compuestas al menos por cinco protolitos: gneis cuarzo-feldespático, rocas graníticas, rocas básicas, ultrabásicas y esquistos.

Rocas del basamento (Paleozoico y Precámbrico)

El basamento del Terreno Oaxaca (del Precámbrico) está constituido por anortositas charnokitas y ortogneis. Los afloramientos de estas rocas se localizan hacia el extremo suroccidental del área. El basamento del Terreno Mixteco (del Paleozoico) es el Complejo Acatlán definido por Ortega-Gutiérrez (1984) como eclogitas, anatexitas, milonitas y serpentinitas. En la zona de contacto entre ambos terrenos (Oaxaca y Mixteco), se presenta un granito de anatexis.

Las rocas más antiguas que se encuentran en la base del Terreno Maya, corresponden con la unidad tectónica denominada por el SGM Complejo Milonítico. Los protolitos de estas rocas son cuarcitas, esquistos de clorita y filitas.

Rocas sedimentarias continentales (Jurásico y Paleozoico)

Tanto los sedimentos paleozoicos de la Formación Matzitzzi de edad Carbonífero-Pérmico como los que constituyen a la Formación Tecomazúchil del Jurásico Medio, corresponden con secuencias continentales, comúnmente denominadas lechos rojos, que consisten de intercalaciones de areniscas, lutitas y conglomerados, materiales que se encuentran cubriendo indistintamente de manera discordante a las rocas metamórficas de los Terrenos Oaxaca o Mixteco. La cobertura comprende los lechos rojos de la Formación Todos Santos del Jurásico Medio.

JURÁSICO MEDIO

Formación Todos Santos

Sobreyace a las rocas intrusivas, como cobertura de traslape, y está constituida por limolitas, y areniscas y conglomerados, con intercalaciones de coladas andesíticas que representan el inicio de la sedimentación mesozoica. Sobre esta formación se depositaron de manera discordante las rocas metamórficas del Terreno Maya, constituidas por varias secuencias relacionadas a cuencas jurásicas (Depresión Ístmica) y jurásicas-cretácicas (Sierra de Chiapas) y de la Cuenca de Zongolica a partir del Jurásico Superior.

JURÁSICO SUPERIOR

Cuenca de Zongolica

Durante el Jurásico Superior se desarrollan dos secuencias sedimentarias en ambientes de depósito diferentes, que se pueden considerar como equivalentes en tiempo. Hacia la parte media de la superficie del acuífero se manifiesta una serie de calizas y calizas dolomitizadas de la Formación San Pedro depositada en un ambiente de plataforma somera.

En tanto que hacia el extremo septentrional del acuífero se manifestó una secuencia clástica-calcárea de ambientes de litoral y marino, de la Formación Tepexilotla, las cuales se agruparon con las rocas del Neocomiano de la Formación Xonamanca, caracterizada por una serie de lutitas y limolitas sensiblemente metamorfizadas, intercaladas hacia la parte media de la columna con paquetes de estratos de arenisca y lutitas, para finalmente coronar la secuencia con una serie de calizas y calizas arcillosas que en conjunto desarrollaron un espesor de 350 m.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Orizaba

Nombre propuesto F. Viniegra (1965) para denominar a una potente secuencia de calizas de plataforma ampliamente distribuida en la región de Orizaba, Ver., la cual consiste de calizas de color gris claro a café, que por su textura pueden ser divididas en dos facies, a las que nombró facies arrecifal y facie subarrecifal, localizadas en el flanco occidental del cerro Escamela, situado al nor-noreste de la ciudad de Orizaba. Consiste de un potente paquete potente de calizas biógenas de hasta 2,500 m de espesor, con estratificación que varía de delgada a gruesa, en donde es común observar estratos de 40 cm hasta cuerpos tabulares muy gruesos de más de 2.5 m de espesor. Se caracteriza por presentar abundante fauna de rudistas y miliólidos que ubican su ambiente de depósito en una plataforma somera, es común que

presente lentes y nódulos de pedernal negro. Estratigráficamente este grueso paquete calcáreo sobreyace concordantemente a los sedimentos detríticos de la Formación Chivillas y subyace concordantemente a las calizas de mar abierto de la Formación Maltrata.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Guzmantla

Está representada en el área por una calcarenita biógena, de color pardo a crema, dispuesta en capas potentes, alteradas por disolución y cubiertas por gruesas capas de caliche que la enmascaran en superficie y que se encuentran parcialmente recristalizadas. Su clasificación de campo varía de mudstone a capas de packstone y grainstone. El espesor de las capas varía de 0.4 a 2.2 m. en algunas localidades se aprecian capas de caliza clástica y conglomerática y algunos estratos de pedernal.

Sus afloramientos se encuentran distribuidos de manera aislada y se compone por una secuencia de ambientes de plataforma caracterizada por calizas de color gris cremoso a gris oscuro estratificadas en capas gruesas y masivas, que en ocasiones desarrollan crecimientos arrecifales en algunos intervalos. Su contacto inferior con la Formación Orizaba es transicional, mientras que su contacto superior no se observa. Se correlaciona con las formaciones Agua Nueva y Maltrata, y al igual que la Formación Orizaba presenta buenas características de porosidad primaria y secundaria, lo que la hace importante como receptora de fluidos

Formación Maltrata

Se conforma de calizas mudstone a wackestone con nódulos y bandas de pedernal negro de 20 y 40 cm de espesor, que se intercalan con lutitas negras con espesores de 5 a 10 cm. Estratigráficamente la unidad descansa en contacto concordante y transicional sobre las calizas de plataforma de la Formación Orizaba. La cima de la Formación Maltrata se relaciona con las calizas de la Formación Guzmantla en contacto abrupto y concordante.

Formación Méndez

Está compuesta por rocas predominantemente arcillosas, representadas por una secuencia bastante homogénea de lutitas calcáreas y margas, dispuestas en estratos delgados y ocasionalmente masivos. Sus afloramientos se encuentran distribuidos en el sector centro occidental del acuífero en donde se encuentran cabalgados por rocas de la Formación Orizaba.

CRETACICO INFERIOR

Cuenca Tlaxiaco

Formación Zapotitlán

Es la más antigua de esta cuenca y consta de una secuencia de lutitas intercaladas con ocasionales bancos de margas, cuya localidad tipo se ubica en los alrededores de Zapotitlán, Puebla. Cubre discordantemente a los lechos rojos del Paleozoico, Formación Matzitzi y/o Jurásico Medio, Formación Tecomazúchil, en tanto que su contacto superior con las formaciones Cipiapa-Miahuatepec y San Juan Raya es concordante.

Formación San Juan Raya

Consiste en una secuencia clástica con abundantes fósiles, conformada principalmente por lutitas calcáreas de color gris verdoso que intemperiza en verde amarillento, intercaladas con areniscas de grano fino a medio que contienen cementante calcáreo, dispuestas en estratos delgados de 3 a 20 cm de espesor. Dentro de esta secuencia clástica en ocasiones se presentan lentes de coquinas arenosas con abundantes ostras. Descansa de manera concordante sobre las rocas de la Formación Zapotitlán, de igual manera es cubierta por rocas de la Formación Miahuatepec.

Formación Miahuatepec

Secuencia de calizas que afloran en la Sierra de Miahuatepec localizada al este de Zapotitlán. Está constituida por calizas de textura wackestone-packstone, ligeramente recristalizadas, de colores gris oscuro, gris y café, dispuestas en estratos de 10 a 30 cm de espesor, con intercalaciones de lutitas y calizas masivas; en la base se observan bandas de pedernal de 3 a 5 cm de espesor. Su contacto inferior con la Formación Zapotitlán es abrupto y concordante, guardando una relación similar con la Formación Cipiapa que le sobreyace.

CRETACICO INFERIOR-SUPERIOR

Formación Cipiapa

Está compuesta por calizas de textura packstone color café claro, en estratos masivos con gran cantidad de macrofauna constituida principalmente por rudistas, esponjas y corales; contiene intercalaciones de estratos de textura mudstone-wackstone, color gris claro en capas de 1 a 2 m de espesor. Presenta un intenso fracturamiento y huellas de disolución. Su contacto inferior es abrupto y concordante con la Formación Zapotitlán y no es cubierta por alguna otra formación marina. Su litología y fauna indica que su depósito tuvo lugar en ambientes de plataforma interna y de borde arrecifal.

CRETACICO INFERIOR

Cuenca Cuicateca

Formación Chivillas

Es una potente sucesión de capas interestratificadas de lutitas, filitas, pizarras, areniscas y escasos conglomerados de edad Valanginiano Superior-Barremiano, que afloran ampliamente al oriente de Tehuacán, constituyendo la parte alta de la Sierra de Chivillas. Muestra incipiente foliación y en conjunto definen un paquete del orden de 900 a 980 m de espesor. En términos generales, este potente paquete de rocas sedimentarias presenta una gran compactación y se encuentra cementado por carbonato de calcio, que le confieren naturaleza impermeable. Su relación con la carpeta sedimentaria de la Cuenca de Zongolica es por medio de una falla de cabalgadura, la cual define la aloctonía de las rocas de la Formación Chivillas.

TERCIARIO (NEÓGENO)

Formación Huajuapán

Está compuesta por clastos angulosos a subredondeados de cuarzo lechoso, areniscas, calizas y esquistos; de tamaño que varía de 0.01 y 0.80 m de diámetro, empacados en una matriz areno-conglomerática, mediana a bien consolidada, color rojizo, en capas que varían de 1 a 5 m, predominando las de tamaño intermedio. Su edad es Oligoceno-Mioceno. Sus afloramientos conforman parte de las laderas de los valles y subyaciendo a la Formación Tehuacán.

Formación Tehuacán

Su porción basal está conformada por un conglomerado con matriz areno calcárea bien litificada, constituido por fragmentos angulosos a redondeados de diversos tamaños y litología (desde el tamaño de grava hasta cantos de 1.0 m de diámetro, dispuestos en estratos gruesos a masivos (mayores a 0.80 m), con algunos lentes arenosos y arcillo-arenosos. La parte media la constituye un paquete eminentemente lacustre, en el que predominan las calizas y lutitas, con capas de anhidrita y bentonita, de color crema y verdoso; a los estratos de bentonita tienen espesores de 20 a 30 centímetros. La parte superior de la formación está constituida por limolitas y areniscas, en estratos de 10 a 40 cm de espesor, color café claro y crema, también con algunos horizontes de bentonita. Su edad corresponde con el Paleoceno-Eoceno.

Conglomerados polimícticos y areniscas

Constituidos por fragmentos de cuarzo lechoso, areniscas, calizas y esquistos; con formas angulosas a subredondeadas, tamaño de 0.01 a 0.80 m de diámetro, empacados en una matriz areno-conglomerática, mediana a bien consolidada, de color rojizo, en capas que varían de 1 a 5 m, predominando las de tamaño intermedio. Afloran en casi toda la extensión de la Cañada Oaxaqueña, conformando parte de las laderas del valle, las características granulométricas de estas rocas, indican que son abanicos aluviales y depósitos de pie de monte.

Rocas Ígneas (Eoceno-Mioceno)

Están representadas por afloramientos menores de tobas andesíticas y coladas de lava de la misma composición, que afloran en la región centro occidental; en donde se encuentran cubriendo discordantemente a diversas formaciones, principalmente a las rocas metamórficas del Complejo Oaxaqueño y las secuencias sedimentarias

Rocas Intrusivas

Están representadas por rocas graníticas del Oligoceno que intrusionan a la mayoría de las unidades. En el Terreno Maya se manifiestan afloramientos aislados de pequeños cuerpos de composición Monzonítica-Dacítica, que intrusionan a las rocas de las Formaciones Chivillas y Maltrata; a estos materiales ígneos se les asignó una edad Terciario Oligoceno-Mioceno.

Mioceno

Formación Suchilquitongo

Secuencia de calizas lacustres y limolitas que contiene el cuerpo de ignimbritas (Toba Etlá), de color verde

CUATERNARIO

Depósitos Aluviales

Estos materiales clásticos de granulometría variable producto de la erosión, transporte y acumulación de las rocas preexistentes; varían desde arcillas, limos y arenas, hasta gravas y cantos y bloques. Se presentan en toda la superficie del valle, con espesores máximos de 100 m, tienen permeabilidad media a alta.

4.2 Geología estructural

Una de las estructuras más sobresalientes es un complejo estructural de más de 130 km de largo y entre 10 a 15 km de ancho con orientación N-S, denominado Complejo

Milonítico Aloapan, que representa el límite entre los Terrenos Tectonoestratigráficos Oaxaca y Maya, delimitada al oriente por la Falla Siempre Viva, que corresponde a una falla de deslizamiento, al poniente por la Falla Oaxaca, que corresponde a una falla de tipo normal originada por la reactivación cenozoica de una antigua cabalgadura Mesozoica y al sur por la Falla Donaji, de tipo normal. La Falla Tamazulapan que constituye el límite de los terrenos tectonoestratigráficos Mixteco y Oaxaqueño, es una falla lateral derecha con rumbo NW30°SE que se flexiona en su porción intermedia para luego tomar una orientación sensiblemente N-S, con echados de 79° hasta verticales hacia el E. Las estructuras en el Terreno Mixteco son principalmente pliegues y cabalgaduras con orientación general NW-SE, el dominio frágil es menos común resaltando la Falla Mixteca de tipo lateral izquierda de rumbo NW-SE, además de fallas normales en todas direcciones; las estructuras del Terreno Oaxaca son pliegues de orientación NW-SE y fallas normales de orientación NW-SE donde se incluyen las fallas Oaxaca y Tomellín, fallas de este sistema conforman el graben de Oaxaca. En el Terreno Maya sobresalen pliegues y cabalgaduras, entre las más importantes destacan la Falla Siempre Viva, estructura de "detachment" con orientación NW-SE y echados hacia el NE, que conforma el límite oriental del complejo milonítico Aloapan. También se tiene un sistema de cabalgaduras con orientación NW-SE, como son La Falla Aloapan, la Falla Vista Hermosa y la Falla Valle Nacional (Carta Geológica-Minera E14-9 "Oaxaca" Esc. 1: 250,000. SGM, 2000).

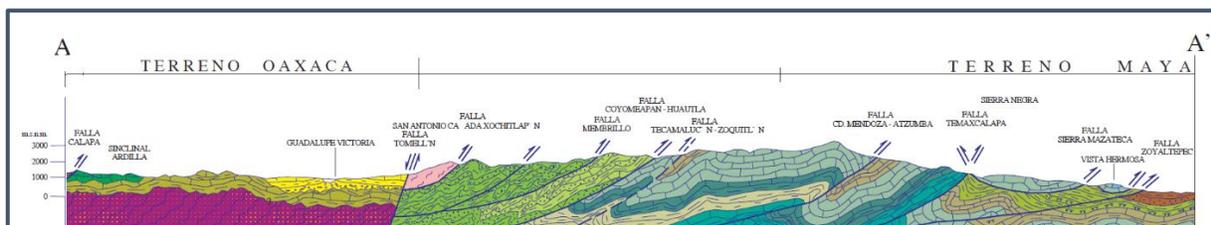
En las zonas de afloramientos de rocas carbonatadas del Cretácico, se presenta un sistema de sinclinales y anticlinales orientados preferentemente en sentido noroeste-sureste, así como diversos sistemas locales de fallas y fracturas que gobiernan el patrón de escurrimiento superficial, que contribuyen además a la formación de sistemas de flujo subterráneo propios de un ambiente cárstico, ya que se observan dolinas y otros rasgos de disolución de las calizas. La región manifiesta los efectos de una deformación compresiva representada por pliegues recumbentes y fallas de cabalgadura, propiciando repeticiones de columna estratigráfica y el consecuente engrosamiento estructural de la misma. Se definen estructuras regionales que influyen en la configuración de los diferentes bloques estructurales, la orientación general que presentan las estructuras plegadas, en dirección NW-SE, definen un vector de esfuerzos en una dirección NE-SW perpendicular al rumbo de los ejes de los pliegues. A partir del Jurásico Medio inicia la apertura del Golfo de México, seguida de subsidencia por enfriamiento y por cambios relativos al nivel del mar del Cretácico Inferior al Cretácico Superior con el depósito de grandes espesores de rocas sedimentarias en diferentes cuencas, que fueron posteriormente deformadas por efectos de la Orogenia Laramide entre al final del Cretácico Superior

y Eoceno Inferior. Posteriormente por efecto de una tectónica distensiva, se origina un reacondicionamiento propiciando un fracturamiento y denudación de materiales en el Terciario, que conformaron las irregularidades estructurales como son la Fosa de Tehuacán al oeste y la Cuenca Terciaria de Veracruz al este. Las secuencias volcánicas terciarias en la región de Huajuapán-Tlaxiaco y Zapotitlán indican que el magmatismo se desarrolló durante la acumulación de depósitos epiclásticos (fluviales y lacustres), piroclásticos, derrames lávicos a intermedios y máficos. Al inicio del Mioceno ocurren las primeras manifestaciones del vulcanismo en la porción central y oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (Carta Geológico-Minera Orizaba E14-16. Escala 1:250,000. SGM, 2001).

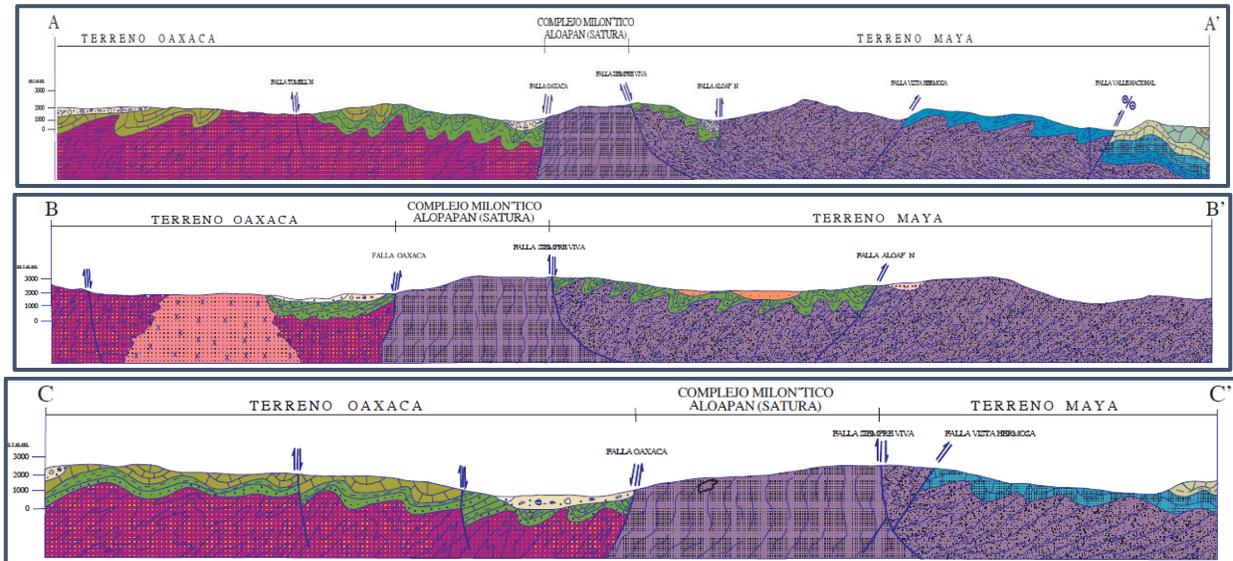
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica así como la geología superficial, recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible establecer que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales de granulometría variable, desde gravas hasta arcillas, que conforman el cauce y la llanura de inundación de los ríos Salado, Grande y otros, y arroyos intermontanos, así como los conglomerados polimícticos, cuyos materiales que los originaron fueron transportados por los escurrimientos superficiales desde las regiones topográficamente más altas de la región. La porción inferior del acuífero está alojada en rocas sedimentarias y volcánicas (areniscas, lutitas, tobas y andesitas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

A mayor profundidad, las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad, y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. El basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas, metasedimentarias y metavolcánicas que constituyen los complejos Oaxaqueño y Acatlán (Figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera OrizabaE14-6 Escala 1:250,000 (SGM, 2001)



Fuente: Carta Geológico-Minera Oaxaca E14-9. Escala 1:250,000 (SGM, 2000)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas.

5 HIDROGEOLOGIA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero, así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen y constitución geológica, es posible definir la presencia de dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado, que conforman un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo de baja capacidad de almacenamiento. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Salado y Grande, entre otros, y sus arroyos tributarios, así como por conglomerados que conforman las planicies aluviales y los piedemonte. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior del acuífero está alojada en rocas sedimentarias y volcánicas (calizas, dolomías, areniscas, lutitas, tobas y andesitas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución para el caso de las calizas y dolomías.

A mayor profundidad, las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, cuando

desaparece su fracturamiento a profundidad, y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. Se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas, metasedimentarias y metavolcánicas que constituyen los complejos Oaxaqueño y Acatlán.

El acuífero está alojado en un estrecho valle alargado en sentido noroeste-sureste, delimitado por sierras constituidas por rocas metamórficas y calcáreas, principalmente. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad, y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Existe muy poca información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. En el estudio realizado en 2010 no fue posible realizar pruebas de bombeo debido a que la gran mayoría de las obras que existen en el acuífero son norias excavadas manualmente, de bajos gastos de extracción manual, espesor y rendimiento reducidos. En lugar de ellas se realizaron 6 pruebas slug cuyos resultados de su interpretación arrojaron valores de conductividad hidráulica de **1 a 20 m/d (11.6×10^{-6} a 2.3×10^{-4} m/s)**. Considerando un espesor saturado promedio de 15 m, se obtienen valores de transmisividad que varían de **0.12 a 17.0×10^{-3} m²/s**. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos o las zonas de mayor espesor saturado.

En cuanto a los valores del rendimiento específico, de acuerdo con la constitución geológica de los materiales que conforman el acuífero, se estima un valor de **0.1 a 0.15** para los depósitos clásticos de mayor granulometría, y de **0.01 a 0.06** para los sedimentos más finos.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles de agua subterránea, se cuenta con información recabada, de los estudios realizados en 2005. Para el planteamiento del balance de las aguas subterráneas se eligió el periodo 2014-2019. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad del nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 2 a 40 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el cauce del río Salado y Grande hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores 2 a 3 m, se registran en los subálveos y las planicies de inundación de los ríos y arroyos; en tanto que las mayores profundidades, de 20 a 40 m, se presentan al oeste de Teotitlán de Flores Magón al sureste de San Juan de los Cués (Figura 4)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que varían de 895 a 550 msnm, los cuales se incrementan de las planicies de inundación de los ríos Salado y Grande, donde se localizan las cargas hidráulicas más bajas, hacia las sierras y a lo largo de ellos conforme se asciende topográficamente. Las mayores elevaciones, de 860 a 895 msnm, se presentan en la porción norte del área de explotación del acuífero, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia el cauce del río Salado, mostrando una dirección preferencial del flujo subterráneo NE-SW y N-S. En la zona sur del área de explotación la dirección de flujo subterráneo es SE-NW, paralela a la dirección de escurrimiento del río Grande (Figura 5).

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración del nivel estático para el periodo 2014-2019 muestra variaciones estacionales por efecto de la alternancia de las temporadas de estiaje y lluvias, registrando valores puntuales de recuperación y abatimiento. Los valores de abatimiento varían de 2 a 1m, es decir 0.4 a 0.2 m anuales, y se presentan en la porción norte de la zona de explotación, al este de San Antonio Nanahuatipam y al suroeste de Teotitlán de Flores Magón, respectivamente. Las recuperaciones son también de 1 a 2m, 0.2 a 0.4 m anuales, y se observaron de manera aislada al oeste de San Martín Toxpalan, al sur de Ayotla y al sur de San Juan de los Cués (Figura 6).

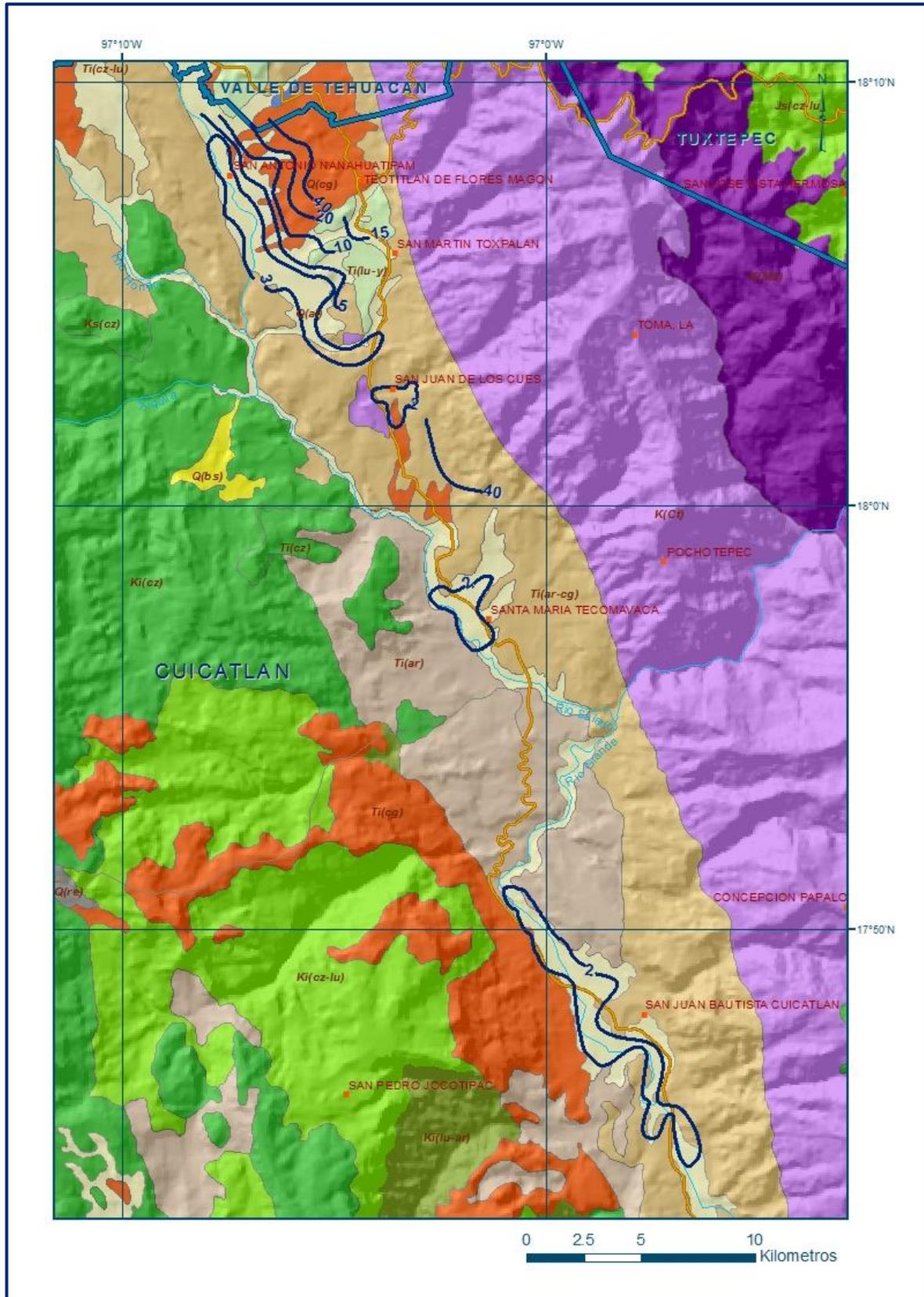


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

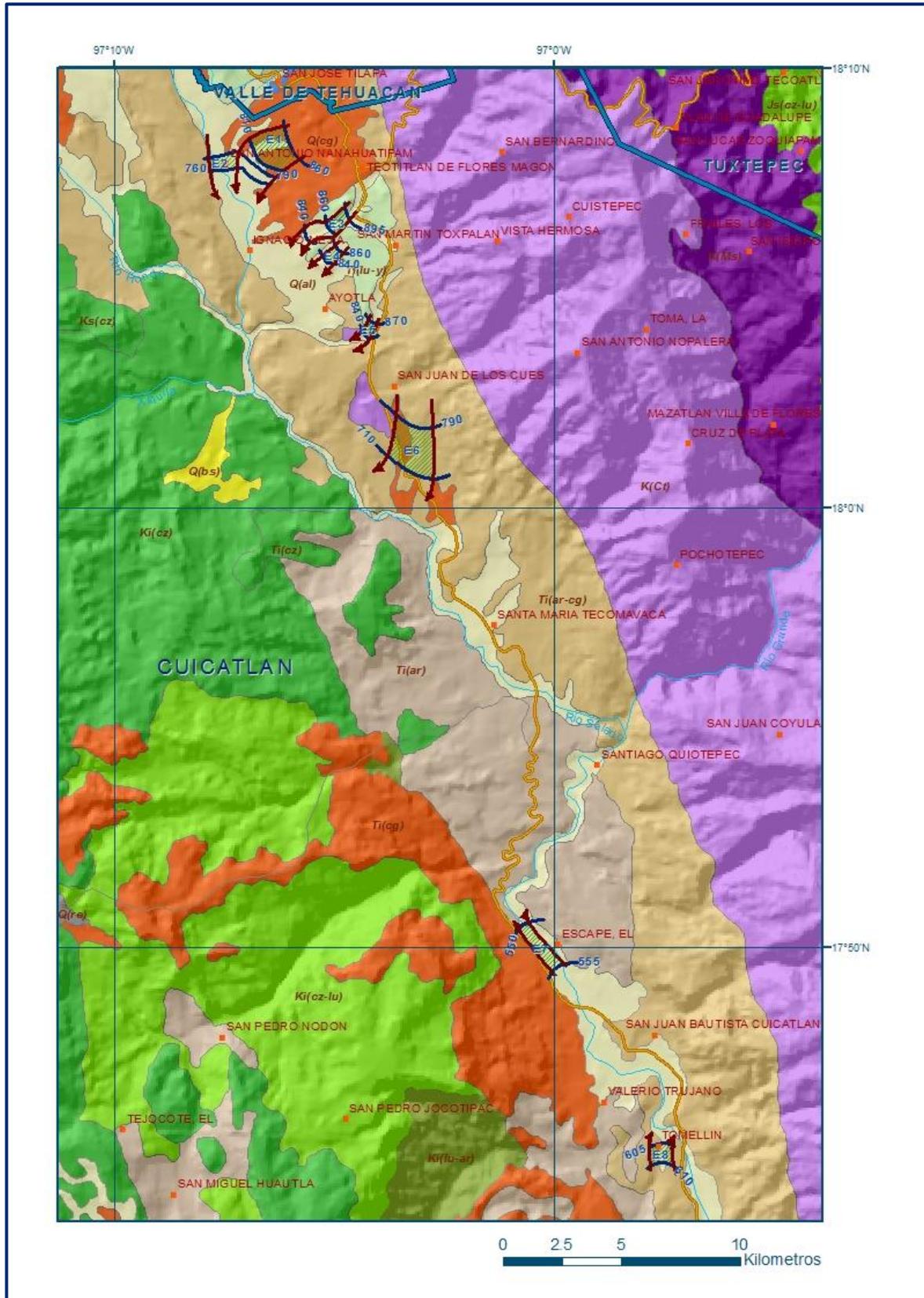


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2016)

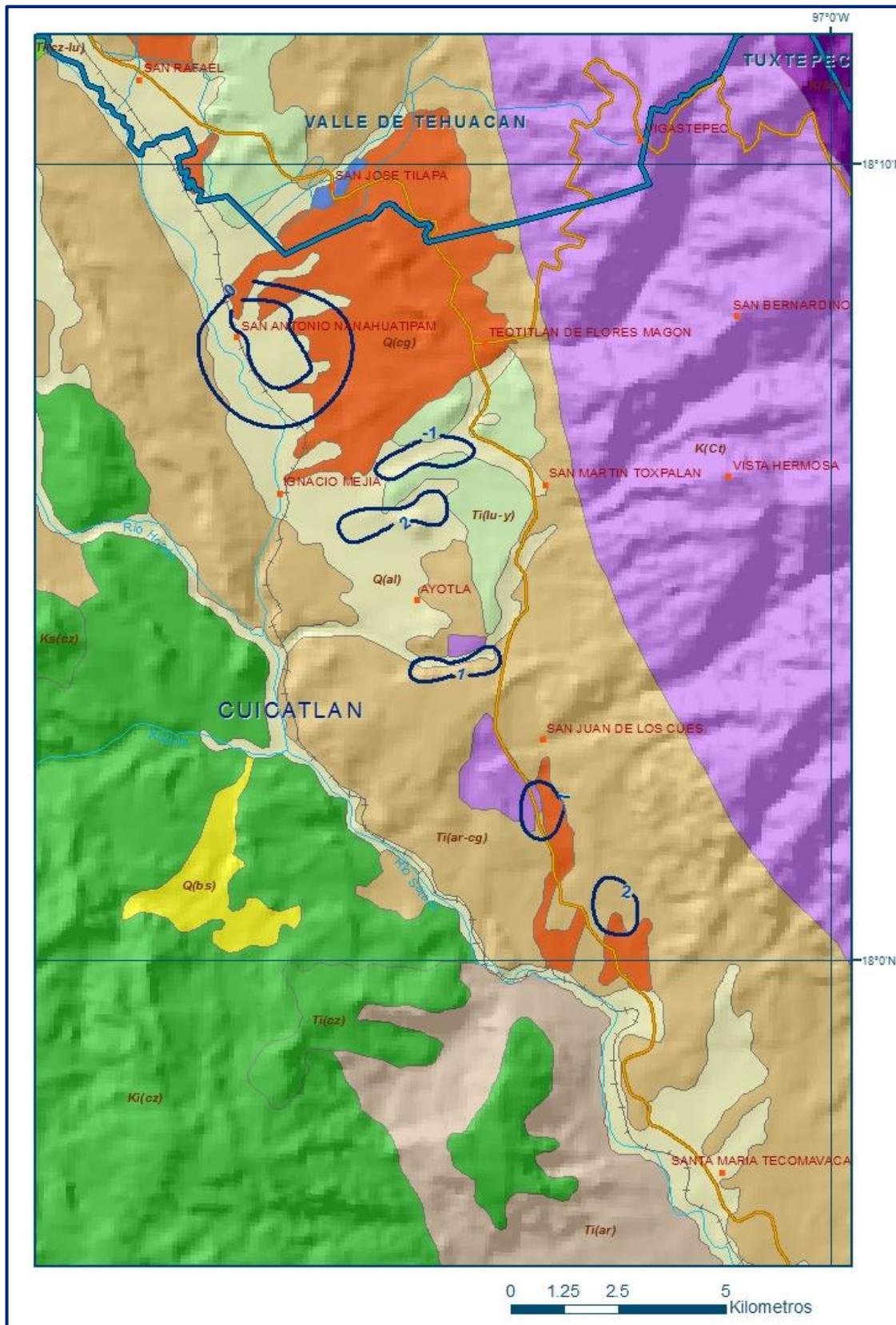


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2014-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado por la CONAGUA en 2010, se recolectaron 15 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (norias), para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos disueltos totales (SDT), fierro, manganeso, arsénico, fosfatos y fluoruros, coliformes fecales y totales, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles (LMP) que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. La concentración de SDT presentó valores que variaron de 109 a menos de 1000 mg/l, que no sobrepasan el LMP de 1000 mg/l establecido en la norma referida. Valores ligeramente superiores a los 1000 posiblemente estén asociados a fuentes puntuales de contaminación, debido a que la mayoría de las norias no tiene ninguna protección sanitaria. De manera general los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, mientras que los mayores se registran en la porción central, reflejando de esta manera las direcciones preferenciales del flujo subterráneo.

La conductividad eléctrica registró valores que variaron de 218 a 2352 $\mu\text{S}/\text{cm}$, predominando valores menores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; solo las norias ubicadas en la zona de Teotitlán presentan valores mayores a 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se registraron valores de temperaturas que varían de 22.2 y 29.4 °C.

De acuerdo con el criterio de Wilcox que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C_2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), que es apropiada para su uso en riego sin restricciones en los cultivos y en el tipo de suelos.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia del agua dominante la bicarbonatada-cálcica en las zonas de San Juan de los Cués y Cuicatlán, que representa agua de reciente infiltración; en

tanto que en la zona de Teotitlán predomina el agua cálcica-sulfatada, asociada con las lutitas y yesos del Terciario.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2010, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Norte, se registró la existencia de 28 aprovechamientos más importantes de agua subterránea. De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **2.2 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022, de los cuales 0.4 hm³ (18.2%) son para uso público-urbano, 1.5 hm³ (68.2%) corresponden al uso agrícola y 0.3 hm³ (13.6%) para doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

EL balance de aguas subterráneas se plateó para el periodo 2014-2019, en un área de balance de **102 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (R_i). Para este caso, debido a que el volumen de extracción es pequeño, se considera que la recarga incidental es despreciable y nula para fines del balance.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

ETR : Evapotranspiración

D_m : Descarga a través de manantiales

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella 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:

$$Q = T * B * i$$

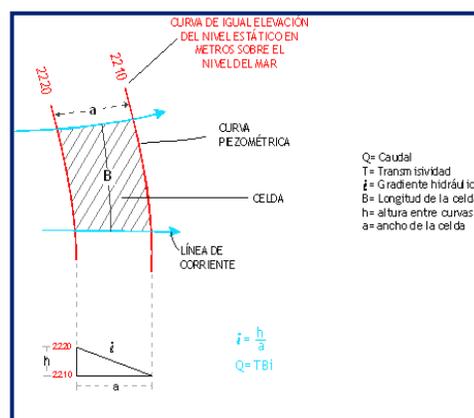
Donde:

Q:Caudal (m³/s)

T:Transmisividad (m²/s)

B:Longitud de la celda (m)

i:Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **27.9hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

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)
E1	1770	1390	30	0.0216	0.0070	0.2674	8.4
E2	1149	643	50	0.0778	0.0020	0.1787	5.6
E3	563	964	35	0.0363	0.0030	0.0613	1.9
E4	526	703	20	0.0284	0.0030	0.0449	1.4
E5	408	655	30	0.0458	0.0050	0.0934	2.9
E6	1769	1779	80	0.0450	0.0020	0.1591	5.0
E7	557	2231	5	0.0022	0.0150	0.0187	0.6
E8	900	810	5	0.0062	0.0120	0.0667	2.1
TOTAL							27.9

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre a través del bombeo (B), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros y a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **2.2 hm³ anuales**.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración es un parámetro que cuantifica la cantidad de agua transferida del suelo a la atmosfera, es la pérdida de agua freática somera, debido a la evaporación y transpiración de las plantas. 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, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 25.9 °C y 866.9 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 816.3 mm anuales, como se muestra a continuación:

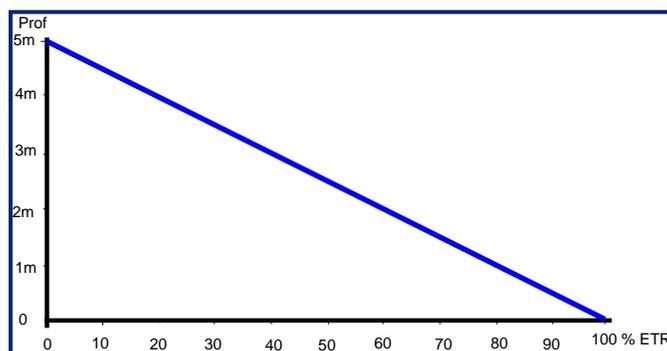
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	25.9		
P(mm) =	866.9	P ² =	751515.61
L =	1816.19895	L ² =	3298578.63
ETR (mm)	816.3		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor

será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El resultado obtenido se puede observar en la tabla 3. El volumen de evapotranspiración **ETR=25.5 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3 a 5	4	5.6	0.8163	0.2	0.9
3	3	14.0	0.8163	0.4	4.6
2	2	40.9	0.8163	0.6	20.0
	TOTAL	60.5		TOTAL	25.5

7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, únicamente se identificaron tres manantiales; sin embargo, de acuerdo con la información de las concesiones de agua superficial procedente de manantiales (2010), en el territorio del acuífero existen 454 títulos por un volumen concesionado de **6.8 hm³ anuales**, que representan un caudal aproximado de 215 lps.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

Para el cálculo de almacenamiento se consideró la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2016 que se muestra en la figura 6. Considerando

esa configuración y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.08$. Se determinó la variación de almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

En la tabla No.4 se puede observar los cálculos realizados para determinar el cambio de almacenamiento del periodo establecido el cual es de -0.6 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-0.1 hm^3** .

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2014-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	S _y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-2	-2.0	2.3	0.08	-0.4
0 a -2	-1.0	6.5	0.08	-0.5
-1	-1.0	2.1	0.08	-0.2
2	2.0	2.4	0.08	0.4
1	1.0	0.9	0.08	0.1
	TOTAL	2.3	TOTAL	-0.6
		Promedio anual		-0.1

Solución a la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 2.2 + 25.5 + 6.8 - 27.9 - 0.1$$

$$R_v = 6.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 6.5 + 27.9 \\ R &= 34.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

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 incidental. Para este caso su valor es **34.4 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprendida (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 el caso del acuífero Cuicatlán, su valor es **6.8 hm³ anuales** que corresponden a la descarga a través de manantiales. Por lo tanto, **DNC = 6.8 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **4'247,691 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 34.4 - 6.8 - 4.247691 \\ \text{DMA} &= 23.352309 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible **de 23'352,309 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2005. Estudio de evaluación hidrogeológica de los sistemas acuíferos de la Cuenca del Río Papaloapan localizados en los estados de Veracruz, Oaxaca y Puebla. Realizado por Consorcio de Ingeniería Mexicana, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2010. Estudio geohidrológico en los acuíferos Cuicatlán, Coatzacoalcos, en el estado de Oaxaca; Jalapa-Coatepec, Tecolutla y Álamo-Tuxpan, en el estado de Veracruz. Realizado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2011. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuicatlán, estado de Veracruz.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019. Información piezométrica e hidrométrica del acuífero Cuicatlán, estado de Oaxaca.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera E14-9 "Oaxaca" Esc. 1:250.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológica-Minera E14-16 "Orizaba" Esc. 1:250.000.