



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO VERDE (2009), ESTADO DE
OAXACA**

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	6
3.1. Provincias fisiográficas.....	6
3.2. Clima.....	7
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología estructural	14
4.3. Geología del subsuelo	15
5. HIDROGEOLOGÍA	16
5.1. Tipo de acuífero.....	16
5.2. Parámetros hidráulicos	17
5.3. Piezometría.....	17
5.4. Comportamiento hidráulico	17
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3. Evolución del nivel estático	19
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1. Entradas.....	22
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	22
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	23
7.1.3. Recarga incidental (Ri)	24
7.2. Salidas.....	24
7.2.1. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.2. Bombeo (B).....	25
7.2.3. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)	25
7.2.4. Evapotranspiración (ETR).....	25
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1. Recarga total media anual (R)	28
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Río Verde-Ejutla, definido con la clave 2009 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-sur del estado de Oaxaca, entre los paralelos $16^{\circ}27'42''$ y $16^{\circ}44'44''$ de latitud norte, y entre los meridianos $96^{\circ}38'23''$ y $97^{\circ}02'32''$ de longitud oeste, cubriendo una superficie de 613 km².

Limita al norte con el acuífero Valles Centrales; al este con Tehuantepec; al sur con el acuífero Miahuatlán; y al oeste y suroeste con Jamiltepec, todos ellos pertenecientes al estado de Oaxaca (Figura 1).

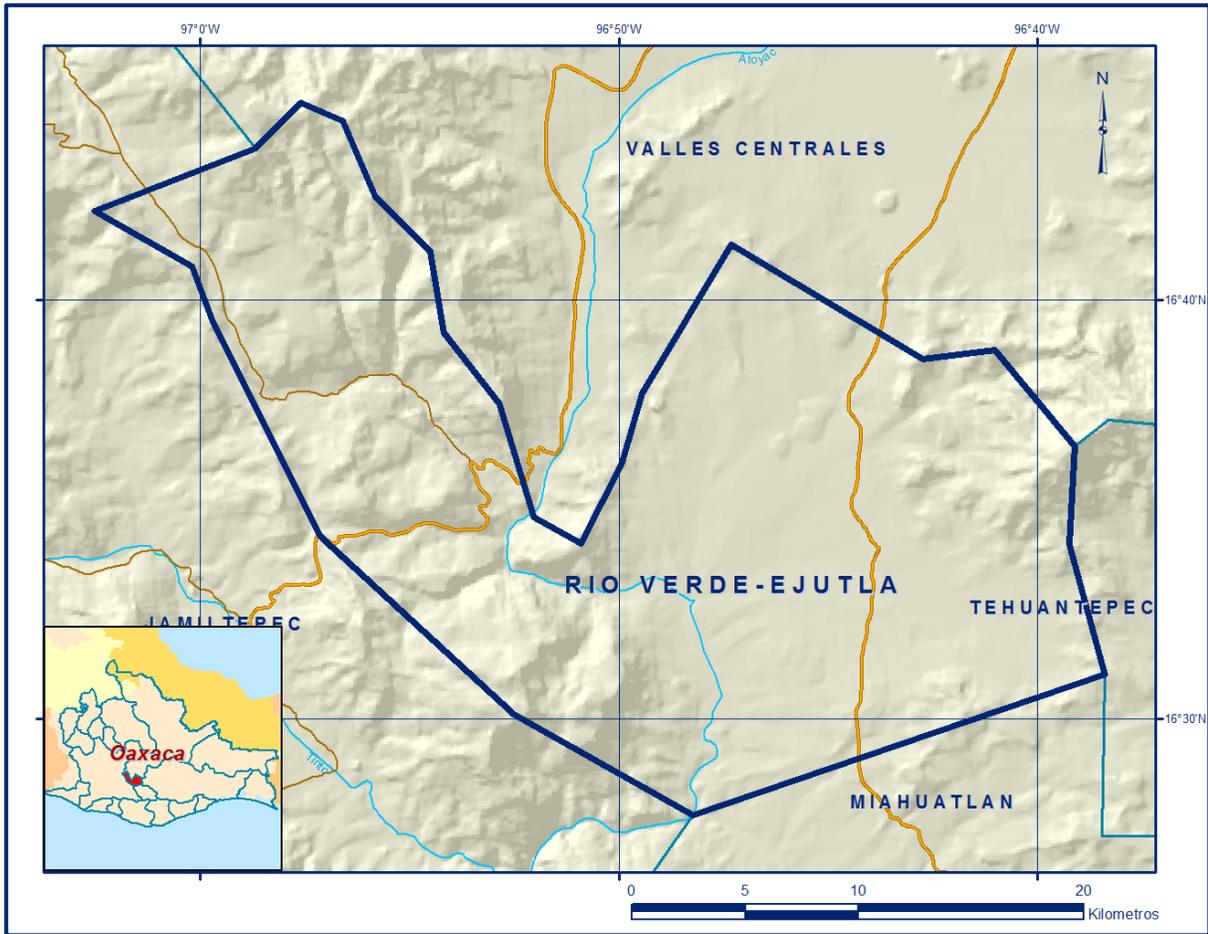


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende el territorio completo de los municipios Taniche y San Miguel Ejutla; casi la totalidad de La Compañía, Ejutla de Crespo, La Pe, San Agustín Amatengo y San Ildefonso Sola; así como porciones menores de San Miguel Mixtepec, San Vicente Lachixio, Santa María Lachixio, Villa Sola de Vega, San Francisco Sola, San Martín Lachil, Yogana, Coatecas Altas, San José del Progreso y San Marín de los Cansecos.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

ACUIFERO 2009 RIO VERDE-EJUTLA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	96	50	54.7	16	34	12.1
2	96	49	54.9	16	36	7.9
3	96	49	26.4	16	37	46.3
4	96	47	19.1	16	41	20.4
5	96	42	44.1	16	38	35.7
6	96	41	1.4	16	38	48.5
7	96	39	7.5	16	36	30.5
8	96	39	15.4	16	34	9.8
9	96	38	23.6	16	31	3.8
10	96	48	14.0	16	27	42.6
11	96	52	30.6	16	30	6.1
12	96	57	8.2	16	34	22.4
13	96	59	41.4	16	39	29.5
14	97	0	11.8	16	40	48.8
15	97	2	31.2	16	42	7.9
16	96	58	40.9	16	43	37.7
17	96	57	35.4	16	44	42.7
18	96	56	35.4	16	44	16.6
19	96	55	50.2	16	42	30.4
20	96	54	29.7	16	41	10.2
21	96	54	11.3	16	39	13.5
22	96	52	50.8	16	37	31.8
23	96	52	1.3	16	34	49.3
1	96	50	54.7	16	34	12.1

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Verde-Ejutla pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Sur y al Consejo de Cuenca Costa de Oaxaca, instalado el 7 de abril de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. En pequeñas áreas de sus extremos noroccidental y nororiental rige el *“Decreto que establece 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 Etlá, Centro, Tlacolula, Zimatlán y Ocotlán, Oax”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de septiembre de 1967; esta veda es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la mayor parte de su superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea; sin embargo, se encuentra sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre*

alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo

El uso principal del agua es el agrícola. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024 el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. A continuación, se describen los más importantes:

ESTUDIO DE EVAUACIÓN DEL VALLE DE ZIMATLÁN, ESTADO DE OAXACA. Realizado en 1984 por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA) para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Los objetivos del estudio fueron conocer las condiciones hidrogeológicas del valle de Zimatlán, determinar su régimen de explotación y cuantificar su disponibilidad. Sus actividades más importantes fueron censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, reconocimientos geológicos e hidrogeológicos de campo e hidrometría de ríos y de las extracciones de agua subterránea. Concluye que el espesor del relleno aluvial de 10 a 100 m y que en el extremo norte del valle de localiza una depresión cuyo espesor alcanza 250 m, con espesores saturados de 15 a 100 m. Calcula una extracción de 45.5 hm³ anuales a través de 283 pozos y de 4000 norias.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO DE VALLES CENTRALES, EDO. DE OAXACA. Realizado en 2001 por COPEI Ingeniería, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo general fue cuantificar la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Valles Centrales (Etlá, Tlacolula y

Zimatlán), con la finalidad de poder implementar las políticas futuras de explotación. Entre sus actividades más importantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, piezometría, muestreo de agua subterránea para análisis fisicoquímicos y ejecución de pruebas de bombeo. Propone el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico para conocer la relación que existe entre los 3 valles; identifica las áreas o estructuras con buenas posibilidades de almacenar agua subterránea y ubicación de sitios y/o zonas para la perforación de nuevos aprovechamientos. Planea el balance de aguas subterráneas, determinando un volumen de recarga media anual de 164 hm³, con una extracción de 88.0 hm³ anuales.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO RÍO VERDE-EJUTLA, OAXACA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Tierras Altas de Oaxaca (Raisz E., 1964). Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI (1989), se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur; las porciones norte, este y sur en la Subprovincia Sierras y Valles de Oaxaca, la región noroccidental y el extremo occidental en la Subprovincia Cordillera Costera del Sur, y pequeñas áreas del extremo noroccidental en la Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca.

La Provincia Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, lugar en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm. Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas. Es la provincia de mayor complejidad geológica, debido a la presencia de rocas sedimentarias, ígneas y la mayor abundancia de rocas metamórficas del país. El choque de las placas tectónicas de

Cocos y Norteamericana, provocó el levantamiento de esta sierra y determina en gran parte su complejidad.

La Subprovincia Sierras y Valles de Oaxaca ocupa la región centro-suroeste de la entidad y tiene una forma burdamente triangular que comprende el 7.2% de la superficie del estado, está formada por un conjunto de sierras bajas respecto de las llanuras que las rodean, constituidas principalmente por rocas ígneas extrusivas del Terciario, excepto en el oriente donde las rocas sedimentarias son del mismo periodo. Las sierras rodean a la unidad llana aluvial de 1,600 msnm conocida como Valles Centrales de Oaxaca, esta unidad tiene tres brazos alargados y la ciudad de Oaxaca de Juárez en el punto central. Hacia el norte de dicha ciudad se extiende el brazo de Etna, hacia el sur el de Ocotlán y Ejutla y hacia el sureste el de Tlacolula, con indicios de antiguo régimen lacustre.

La Subprovincia Cordillera Costera del Sur se extiende en sentido noroeste-sureste, desde el sur de la ciudad de Colima hasta el oriente de Pluma Hidalgo, Oaxaca, a lo largo de la zona de subducción de la placa de Cocos a cuyos desplazamientos a través del tiempo debe su origen y evolución. En la porción oaxaqueña dominan rocas metamórficas del Precámbrico, rocas ígneas intrusivas del Mesozoico hacia el norte, noroeste y oeste de Santa Catarina Juquila, así como sedimentarias del Terciario en la zona de Santiago Juxtlahuaca y del Cretácico al norte y este de Putla Villa de Guerrero.

Por su parte, la Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca es una región más o menos paralela a 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. Su porción norte, dentro del estado de Puebla, es conocida como sierra de Zapotitlán, donde predominan las rocas calizas del Cretácico, que originan cumbres elevadas a más de 2,000 msnm. En el sur contiene afloramientos de rocas metamórficas, con abundancia de gneis donde las laderas son escarpadas.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en los valles es semicálido subhúmedo del grupo C (A)C(wo) y clima semiárido cálido BS1hw; ambos con temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C, precipitación del mes más seco menor de 40 mm, régimen de lluvias en verano, con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

En las regiones topográficamente más altas que cubren las regiones nororiental, suroccidental y noroccidental, predomina el clima templado subhúmedo en sus variantes C(wo) y C(wl), con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; presenta régimen de lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero con registro para diferentes periodos: San Miguel Ejutla, Miahuatlán, San Jerónimo Taviche, Ejutla de Crespo y Huixtepec. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **610 mm, 21.5 °C y 1850mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-20 “Costa Chica de Guerrero”, Subregión Hidrológica “Río Verde”, cuenca del Río Atoyac o Verde, drenada por el río del mismo nombre, que vierte su caudal en el Océano Pacífico.

El Río Atoyac es el dren principal del acuífero. Nace en la Sierra de Sedas con el nombre de Río Etlá, a una elevación de 2,000 msnm; en su primer tramo escurre con una dirección general hacia el sureste hasta la ciudad de Oaxaca, continuando en dirección noroeste-sureste a través del valle de Etlá, en donde recibe las aportaciones de una gran cantidad de arroyos de tipo intermitente. En el valle de Zimatlán entra en su extremo norte, con una dirección de escurrimiento norte-sur; aproximadamente a unos 5 km aguas abajo de la Ciudad de Oaxaca, a la altura del poblado San Agustín de Las Juntas, recibe por la margen izquierda las aguas del Río Salado, unos de sus principales afluentes y colector más importante del valle de Tlacolula. Continúa hacia el sur con el nombre de Río Atoyac, recibiendo varios tributarios provenientes de las sierras que flanquean el valle, pasa por Zimatlán de Álvarez y continúa hasta la altura de Santa Gertrudis, donde confluye por su margen izquierda el Río Ocotlán. En este punto cambia su dirección de escurrimiento hacia el suroeste y pasa por Santa Ana Tlapacoyan donde se le unen las aguas del Río La Asunción o San Bernardo. Después continúa hacia el sur-suroeste por 15 km más, pasando por Santa María Ayoquezco de Aldama y San Andrés Zabache para salir del Valle de Zimatlán por su extremo sur e ingresar en el acuífero Río Verde-Ejutla; finalmente se une al Río Verde y desemboca en el Océano Pacífico. Desde su

nacimiento hasta su confluencia con el Río Salado, el Río ETLA es intermitente. En el valle de Zimatlán y a lo largo del acuífero Río Verde-Ejutla, el río Atoyac se comporta, en algunos tramos, como tipo perenne. En particular la zona de Ejutla es drenada por el Arroyo Prieto y el Río Ejutla que son afluentes del Río Atoyac, los cuales confluyen a él a la altura del poblado La Compañía.

La red de drenaje es de tipo dendrítico en las partes topográficamente más altas y dendrítico denso en los afloramientos de rocas metamórficas. En las zonas bajas y flancos de las sierras el drenaje es subparalelo a paralelo. No existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial.

3.4. Geomorfología

La característica geomorfológica predominante en la zona es el contraste del relieve por el cambio abrupto de pendiente entre la región norte, correspondiente a la Sierra Madre del Sur y los valles intermontanos de relieve muy suave, debido a la resistencia a la erosión de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas de la sierra, comparadas con los suelos y materiales de relleno que forman la planicie. Contrasta también la etapa geomorfológica de madurez que presentan las sierras que ocupan la mayor superficie del área y que no han alcanzado un nivel base de erosión, con la etapa de juventud avanzada que presentan los valles. Los valles intermontanos están constituidos por sedimentos aluviales derivados principalmente de las rocas ígneas y metamórficas, erosionados, arrastrados por las corrientes y depositados en las partes bajas.

Se identifican tres unidades geomorfológicas principales: Sierras y Montañas Complejas, constituidas por rocas metamórficas precámbricas que conforman las zonas topográficamente más altas y parteaguas de los valles, con altitudes hasta de 3,100 msnm. También están conformadas por rocas calcáreas correlacionables con la Formación Teposcolula de edad Cretácico Inferior que funcionan como zona de recarga, y rocas volcánicas andesíticas. Los Pie de Monte se presentan forma de pequeños abanicos aluviales constituidos por conglomerados y areniscas, en ocasiones intercaladas por lutitas, que conforman las estribaciones de las sierras. La tercera unidad son los valles; amplios y limitados hacia sus márgenes por sierras de mediana altura, están cubiertos predominantemente por material de acarreo cuyo espesor varía de pocos metros hasta los 120 m. Son de forma alargada, de hasta 20 km de longitud por 10 km en su parte más ancha, con altitudes de 1,400 a 1,450 msnm.

4. GEOLOGÍA

La región en la que se ubica el acuífero, al igual que toda la porción sur de México, presenta una geología compleja debido a que en ella confluyen 3 elementos tectónicos amalgamados en diferentes momentos geológicos, que son los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983) Xolapa, Oaxaca y Mixteco, relacionados con los complejos metamórficos Xolapa, Oaxaqueño y Acatlán, respectivamente (Figura 2).

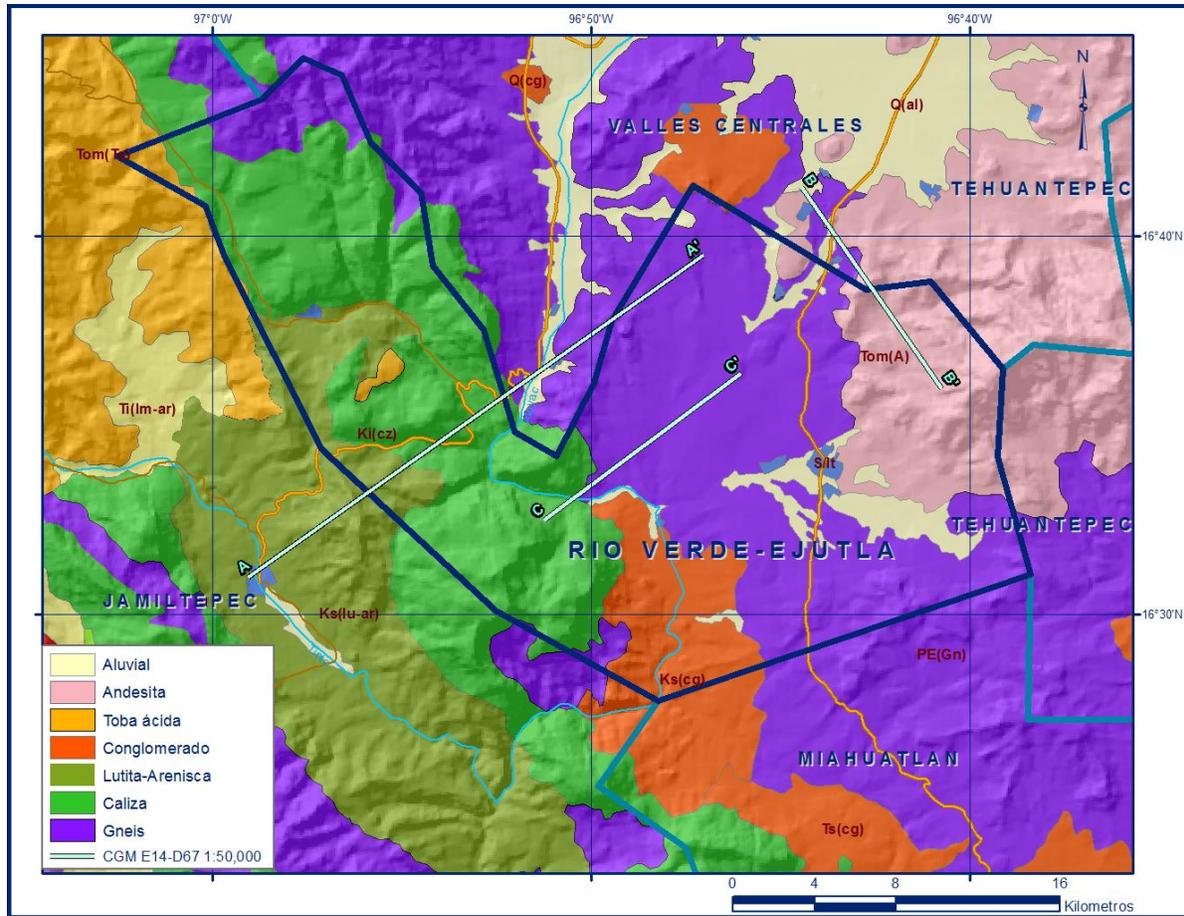


Figura 2. Geología general del acuífero

De acuerdo con la delimitación de los Terrenos tectonoestratigráficos, la región en la que se ubica el acuífero pertenece a los Terrenos Oaxaca (Zapoteco) Campa U. M.F. et al. (1983). El basamento lo constituyen las rocas metamórficas del Complejo Oaxaqueño que afloran en la porción oriental, conformadas por paragneis, diques pegmatíticos y diques de composición granítica, sienítica y anfibolítica. Expuestos hacia la porción sur-este, existen afloramientos escasos de mármol cipolino los cuales, al igual que las rocas del basamento, se consideran de edad Proterozoico Medio. El Complejo Oaxaqueño está cubierto discordantemente por una columna sedimentaria mesozoica que pertenece a la Cuenca de Tlaxiaco, en donde la unidad

más antigua es la Formación Sola de Vega, que aflora en una franja NW-SE, en las porciones occidental y suroccidental de la zona. La unidad está compuesta por una secuencia de areniscas, lutitas, conglomerados polimícticos y andesitas, a la cual se le determinó un espesor de 550 m y una edad Oxfordiano-Berriasiano. Presenta un cambio de facies lateral con la Formación San Isidro, cuyos afloramientos son escasos y de poca extensión, conformados por areniscas, calizas, limolitas y lutitas, expuestos en forma de lentes alargados en dirección NW-SE en los sectores noroccidental y sur de la región. Su edad es de forma concordante y transicional con la Formación Teposcolula que afloran en una franja con dirección NW-SE y aproximadamente 10 km de ancho en los sectores noroccidental y suroccidental de la región. Litológicamente está constituida por calizas, dolomías y calizas dolomitizadas de interés económico por sus contenidos de carbonato de calcio, la obtención de grava y condiciones para obtener bloques dimensionales. Su edad se considera Albiano-Cenomaniano. Le sobreyace de forma concordante y transicional la Formación Tilantongo, que aflora hacia las porciones occidental-central y suroccidental y consiste de areniscas, areniscas calcáreas y lutitas del Turoniano-Maastrichtiano. Está cubierta discordantemente por la Formación Tamazulapan, que aflora con excelentes exposiciones en una franja irregular NW-SE al suroeste de la zona, en donde se observa un conglomerado polimíctico con intercalaciones de areniscas y limolitas. El conglomerado está constituido por clastos subangulosos y subredondeados de paragneis, cuarzo, pedernal y areniscas. Discordantemente sobreyace a algunas de las unidades más antiguas.

Se identifican dos eventos ígneos, uno extrusivo con afloramientos en el sector oriente, parte media e inferior y algunos más escasos hacia el poniente-centro, que está constituido por tobas, brechas y flujos andesíticos de edad Oligoceno-Mioceno. El segundo es de carácter intrusivo y está representado por granodioritas y pórfidos de composición andesítica-dacítica. Los principales afloramientos de rocas cristalinas se ubican en la porción media-oriental y en menor proporción al suroeste. La edad de las intrusiones se considera Mioceno. Las unidades del Cuaternario están representadas por un reducido depósito de travertino expuesto en la porción centro-poniente; por depósitos de limo-arena que conforman las planicies y bajíos, y de aluviones acumulados en los cauces y márgenes de las principales corrientes de agua (Carta Geológico-Minera Ejutla de Crespo E14-D67. Escala 1:50,000. SGM, 2010).

4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Precámbrico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos aluviales. En la región están presentes diferentes

terrenos tectonoestratigráficos, que se clasifican de acuerdo con sus basamentos. La cubierta incluye rocas volcánicas y sedimentarias probablemente deformadas durante el Jurásico o el Cretácico, calizas del Cretácico Inferior y conglomerados del Cretácico Inferior-Cretácico Superior, así como rocas volcánicas continentales del Paleógeno y Neógeno.

TERRENO OAXACA

PRECÁMBRICO

El Terreno Oaxaca consta de un basamento cristalino conocido como **Complejo Oaxaqueño** (Fries, 1962), conformado por ortogneises cuarzo feldespáticos, paragneises con grafito y mármoles de tipo cipolino, anfibolitas, intrusivos de charnokitas, anortositas, pegmatitas y milonitas, características de una facies de granulita. Existen varias edades isotópicas, aunque variables confirman su edad Proterozoica. Aflora en la región central del estado de Oaxaca, desde el límite con el estado de Puebla hasta la cercanía de Pochutla, con dirección N-NW, definiendo una franja continua, parcialmente cubierta en algunos sitios. Está limitado hacia el occidente por rocas metagraníticas y esquistos del Complejo Acatlán, hacia el sur por gneises, migmatitas y esquistos correlacionables con el Complejo Xolapa, y en la parte meridional por un cuerpo milonitizado con estructura lineal, por la cobertura mesozoica y los terrenos volcánicos terciarios, que se encuentran ampliamente distribuidos en la zona.

JURÁSICO

Formación Sola de Vega

Sobreyaciendo al Complejo Oaxaqueño en clara discordancia erosional, se encuentra la Formación Sola de Vega, constituida por una secuencia rítmica de areniscas y lutitas calcáreas con conglomerado basal de edad Jurásico Superior.

CRETÁCICO

Formación San Isidro

Cubriendo parcialmente a las rocas anteriores, se encuentran las rocas de la Formación San Isidro, de edad Berriasiano-Aptiano, constituida por areniscas, calizas y lutitas, que representa la Cuenca de Tlaxiaco; y la **Formación Jaltepetongo** de edad Neocomiano-Aptiano, que consiste de areniscas, y lutitas bituminosas, que representa a la Cuenca de Oaxaca. Aflora principalmente en los flancos de las serranías que bordean el Valle de Etna, la porción noroeste del Valle de Tlaxolula, en la sierra que separa los valles de Zimatlán y Tlaxolula, así como en el límite sureste del Valle de Tlaxolula. Las areniscas son de color gris claro e intemperizan en amarillo ocre o café pardo, su textura es de grano fino a medio, bien compactas y con

fracturas rellenas con calcita. Las lutitas son de color gris verdoso que intemperizan a café pardo, muy deleznales; se presentan plegadas y fracturadas en concordancia con las deformaciones regionales observadas.

Formación Teposcolula

Conformada por calizas biomicríticas poco fosilíferas de tipo arrecifal, dispuestas generalmente en estratos gruesos que contienen nódulos de pedernal. Son de color gris claro a café claro y parcialmente dolomitizadas. Afloran al noreste de la zona, en la serranía que separa los valles de Zimatlán y Tlacolula, así como al suroeste en donde se observa el mayor afloramiento. Es de color gris claro a crema que al intemperizarse se vuelve gris blanquecino, textura criptocristalina y compacta. Se le asigna una edad que corresponde al Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano).

Formación Tilantongo

Originalmente fue definida por Salas, G.P. (1949) en su localidad tipo que se localiza entre los poblados Tilantongo y San Bartolo Yucuñao. Consiste de unos 200 m de margas de color gris-azul que yacen aparentemente de manera concordante sobre las calizas Petlalcingo y pudieran ser los equivalentes a las margas Yucunama y a la Formación Méndez del oriente de México. Sus afloramientos al igual que las calizas Petlalcingo son escasos debido a su fácil erosión.

Ferrusquía I. (1970) propone el nombre de Formación Yucunama para designar a las calizas margosas color crema amarillento que ocupan el sinclinal que separa los dos anclinales del Macizo Central. Tanto en el límite inferior como en el superior son discordantes y ambos afloran en el área. Su espesor es del orden de 300 a 400 m. Su localidad tipo es el pueblo de San Pedro Yucunama, situado cerca del margen occidental del sinclinal.

TERCIARIO

Conglomerado Tamazulapan

Con este nombre se denomina a las rocas conglomeráticas que afloran en forma de franjas angostas en la mitad norte de la margen occidental del macizo central cretácico, que aflora en el extremo norte del Valle de ETLA y el extremo sur del Valle de Zimatlán, en discordancia angular y erosional sobre las calizas de las formaciones Teposcolula o Yushé; su inclinación se debe a la inclinación de bloques fallados. Es un conglomerado constituido por fragmentos de roca calizas de la Formación Yushé, de hasta 60 cm de diámetro, masivo y compacto, embebidos en una matriz arenosa de color rojizo, cementada por carbonato de calcio. Su edad no se ha determinado con precisión por falta de fósiles; sin embargo, la presencia de materiales volcánicos

y sus relaciones estructurales, la correlacionan con el conglomerado basal del Grupo Balsas y con el Conglomerado Rojo que aflora en diferentes partes del país, que tienen una edad Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano.

Rocas Intrusivas

A este periodo pertenecen las rocas volcánicas de la Sierra Madre del Sur y las intrusivas que afloran en la zona. El intrusivo granítico aflora de manera restringida, tiene textura granular, holocristalina y presenta intenso fracturamiento de dimensiones de centímetros a decímetros. Su mineralogía está constituida por cristales de cuarzo, mica y feldespato. Muestra también intemperismo químico que se reconoce por la presencia de caolinita como resultado de la alteración de los feldespatos

Rocas Volcánicas

Están representadas por una secuencia de rocas de composición generalmente andesítica, asociadas a las rocas de origen piroclástico, tales como tobas cristalinas, arenosas y líticas, que afloran en el extremo noroccidental y oriental de la zona. Las andesitas con las que presentan mayor distribución en el área. Son densas y masivas, de color gris oscuro, textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol; presentan intenso fracturamiento y fragmentación.

CUATERNARIO

Unidad está constituida por depósitos sedimentarios recientes, constituidos por una mezcla heterogénea de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas con escasa cementación y compactación, y una clasificación muy pobre, que rellenan los valles, cauces y zonas de inundación; así como conglomerados de fragmentos de rocas origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Su espesor es variable e irregular ya que varía entre 30 y 150 metros hacia el centro de ellos, reduciéndose considerablemente hacia las laderas hasta más o menos 10 m. Incluye depósitos locales de travertino

4.2. Geología estructural

Estructuralmente, las rocas metamórficas evidencian un proceso de deformación dúctil, representado por foliación que, en algunos casos, es penetrativa y afecta a las rocas que constituyen el Complejo Oaxaqueño. La foliación es producto de una intensa y continua deformación que extinguió en gran medida los rasgos y estructuras originales de las rocas, y actualmente se manifiesta como un bandeamiento plegado isoclinalmente y foliado penetrativamente. La deformación está orientada preferentemente al NW-SE, con buzamiento al SW y NE y en menor grado con dirección al NE-SW e inclinaciones al NW y SE. La deformación frágil

corresponde a fallamiento normal y de componente lateral relacionados a una etapa distensiva post orogénica del Terciario, que se manifiesta como dos sistemas; el principal con rumbo NW-SE, que afecta a casi todas las unidades, al que pertenecen las fallas normales Las Juntas, Coatecas I, La Ermita, Nevería, El Guayabo, Paxtle, Palo Blanco, El Nogal, El Obispo y La Compañía y como fallas laterales las estructuras Buenavista, La Lllamarada, San Juan 1, Tres Pescados y Agua Blanca. Un sistema secundario, con dirección NE-SW está representado por fallas normales como El Bayito, Coapan y El Nachihui, y laterales como Río Lima y Cerro Llego Cuatsa. Además de las estructuras mencionadas se identificó la falla El Brujo que tiene dirección N-S.

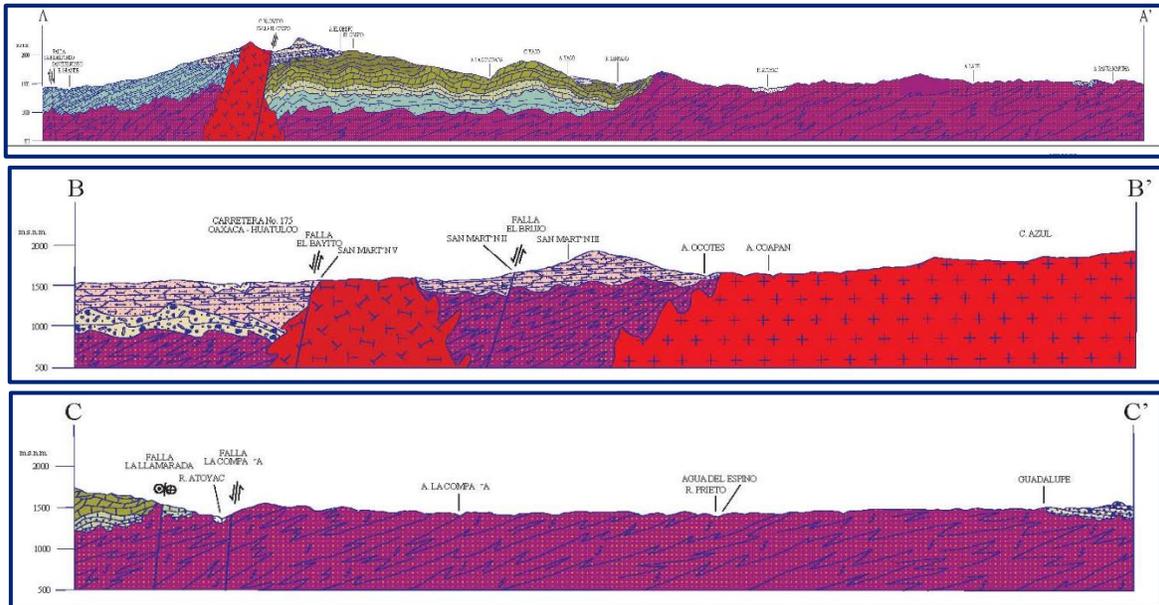
Algunos autores consideran que las rocas del Complejo Oaxaqueño se formaron en la porción sur de Canadá y Escandinavia, entre 1,300 y 1,000 millones de años, migrando al sureste de Canadá durante el Proterozoico Tardío y el Cámbrico. Hacia el Jurásico Superior, con el cese de la apertura del Golfo de México, se provoca una etapa de transgresión y subsidencia que permitió el depósito de una gran cantidad de rocas carbonatadas y sedimentos terrígenos de las formaciones Sola de Vega, San Isidro, Teposcolula y Tilantongo en la Cuenca de Tlaxiaco. Posteriormente, ocurre el depósito de molasa de la Formación Tamazulapan, seguido de una etapa de vulcanismo hacia el Oligoceno y parte del Mioceno, con productos de composición andesítica. Durante el Mioceno, también se emplazan intrusivos granodioríticos y pórfidos de composición andesítica-dacítica (Carta Geológico-Minera Ejutla de Crespo E14-D67. Escala 1:50,000. SGM, 2010).

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica 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 de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Atoyac o Verde y arroyos tributarios, y los conglomerados que conforman los pie de monte; cuyo espesor varía de 10 a 120 m.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, entre las que destacan andesitas y tobas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, así como la parte alterada de rocas intrusivas y metamórficas. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas, limolitas, margas y areniscas. La secuencia de rocas volcánicas

y calizas cretácicas constituye un acuífero potencial, que puede presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento debido a que están sobreyacidas o alternadas con lutitas, limolitas y areniscas (figura 3), como lo demuestran algunos pozos perforados en rocas volcánicas en el acuífero Valles Centrales.



Fuente: Carta Geológica-Minera Ejutla de Crespo. E14-D67 Esc.1:50.000 (SGM, 2010)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

A partir de la información geológica e hidrogeológica superficial y del subsuelo del acuífero, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, de baja capacidad de almacenamiento, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a limos, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Atoyac o Verde y arroyos tributarios, cuyo espesor alcanza hasta 120 m en el centro de los valles y disminuye gradualmente hacia los flancos de las sierras de que los delimitan. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas principalmente volcánicas, entre las que destacan andesitas y tobas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las rocas volcánicas y calizas constituyen horizontes acuíferos

que pueden presentar condiciones de **semiconfinamiento o confinamiento**, debido a que están sobreyacidas o alternadas con lutitas, limolitas y areniscas.

5.2. Parámetros hidráulicos

No existe información disponible de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en el acuífero. Sin embargo, se dispone de resultados de pruebas de corta duración realizadas tanto en etapa de abatimiento como de recuperación en los acuíferos vecinos Valles Centrales (SARH, 1978 y CONAGUA 2001) y Miahuatlán (CONAGUA 2010), que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que valores de transmisividad varían en un rango muy amplio de **6.8×10^{-5} a $39.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (5.9 a 3413 $\text{m}^2/\text{día}$)**. La conductividad hidráulica varía de **0.3 a 42.7 m/d (3.7×10^{-6} a $4.9 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)**. 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 a zonas de mayor espesor saturado.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, para fines del balance de agua subterránea se consideró un valor del rendimiento específico S_y de 0.03.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información de registros históricos durante el periodo 2003-2017, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2015-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. 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 al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron desde 3 m que se registraron en las llanuras de inundación de los ríos Atoyac o Verde y arroyos tributarios, hasta 20 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros,

menores de 5 m, se registraron en las porciones centrales de los valles, a lo largo de los ríos y arroyos; en tanto que las mayores profundidades, de 10 a 20 m, se presentaron en la porción central del acuífero, al suroeste de Ejutla de Crespo (Figura 4).

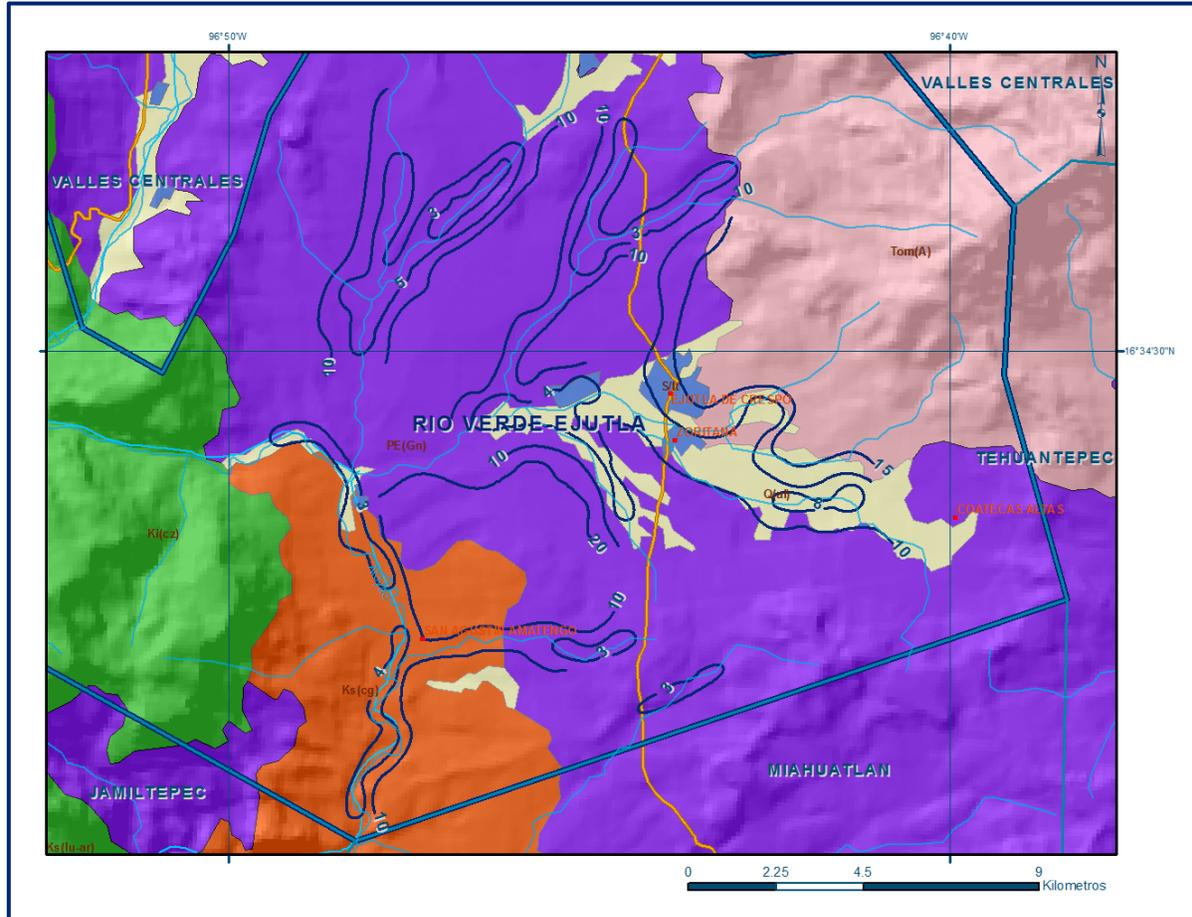


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1340 a 1520 msnm, que se incrementan de sur a norte en los valles del río Verde y de oeste a este en el valle de Ejutla, a lo largo del cauce del río Verde y arroyo tributario, respectivamente, y en dirección a los flancos de las sierras que delimitan dichos valles. Los valores más altos, 1450 a 1520 msnm, se registraron en el extremo norte del valle del río Verde, al este del valle de Ejutla y al este del poblado San Agustín Amatengo, desde donde descienden gradualmente hacia el sur y oeste, respectivamente, por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, a lo largo del cauce del río Verde y arroyos tributarios. Los valores más bajos de carga hidráulica, de 1345 a 1340 msnm, se presentan en la porción sur del acuífero, al sur de San Agustín Amatengo, en donde el río Verde se

encañona para dirigirse hacia el acuífero vecino Jamiltepec. De esta manera, se definen direcciones preferenciales del flujo subterráneo: norte-sur, en el valle del río Verde, y este-oeste en los valles de Ejutla y San Agustín Amatengo (Figura 5).

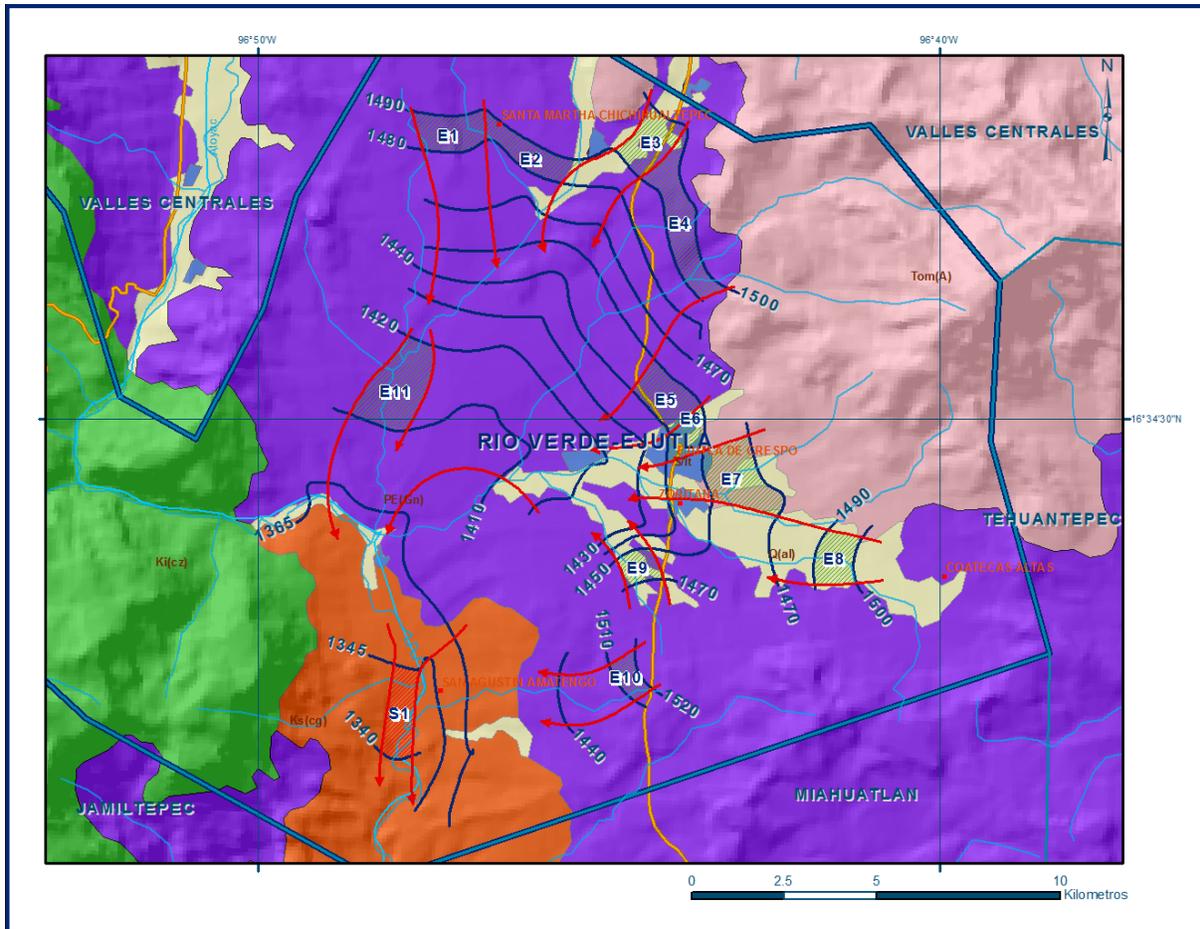


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2015-2019 registra valores de abatimiento que varían de 1 a 3 m, es decir de 0.25 a 0.75 m anuales, con valores puntuales de 5 y 6 m, y se registran en la porción centro-oriental del acuífero, en el valle de Ejutla; los cuales disminuyen gradualmente hacia sus flancos, hasta desaparecer. Los máximos abatimientos, 5 y 6 m, que representan 1.25 a 1.5 m anuales, se presentan al norte y suroeste de Ejutla de Crespo, respectivamente (Figura 6).

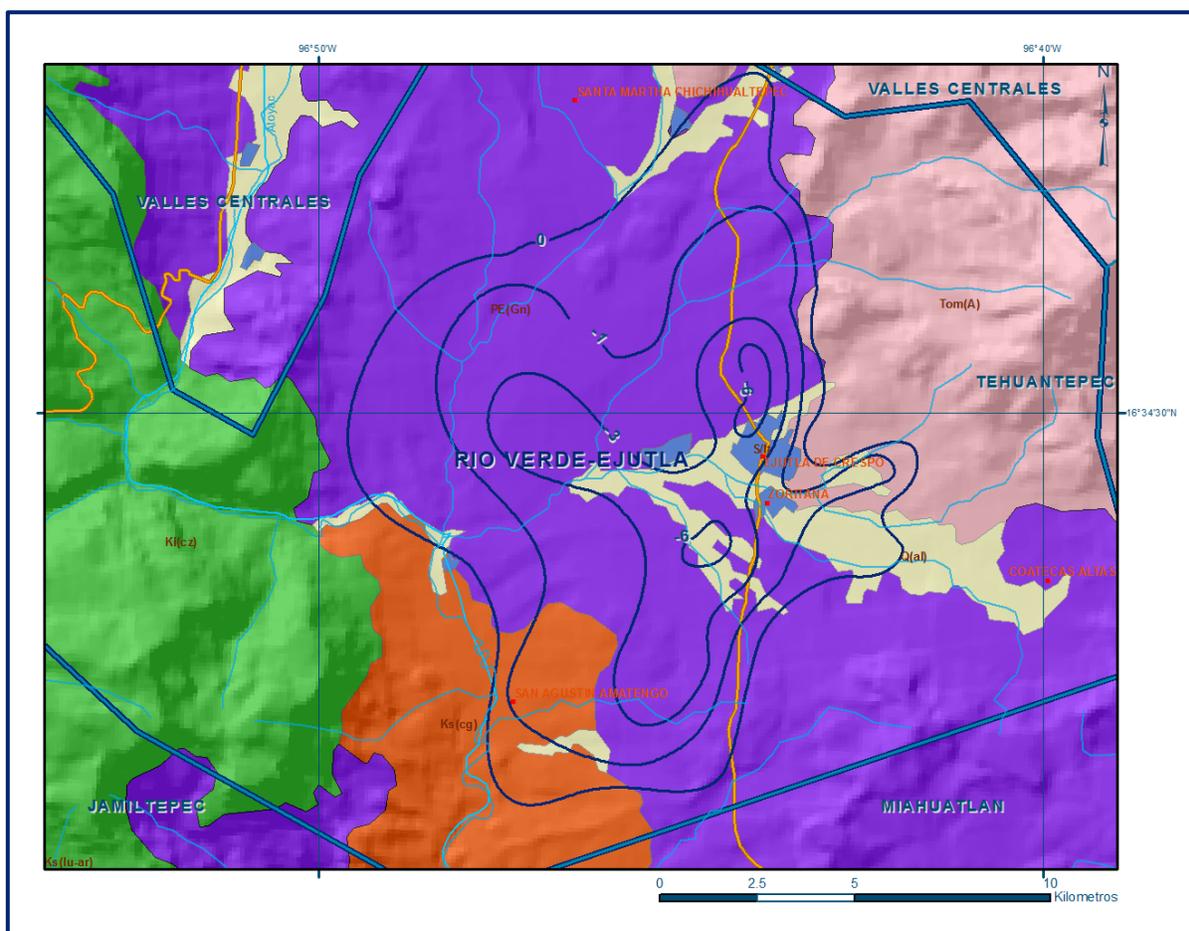


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2015-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018) en el año 2018 se midieron los parámetros de campo y se tomaron muestras de agua subterránea de dos norias, para su análisis en el laboratorio. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De acuerdo con los resultados de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos, se determinó que la concentración de SDT variaba de 280 a 317 mg/l, que no supera el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido por 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. El único parámetro cuya concentración supera el LMP establecido en la norma referida es el de coliformes fecales, ya que la concentración máxima encontrada en el agua subterránea es de 1500 NMP/100ml, mientras que el LMP para uso y consumo humano es no detectable.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 423 a 464mS/cm, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de temperatura varían de 22.1 a 22.2°C y el pH de 7.0 a 7.8.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-cálcica, que corresponde al agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánicas y calcáreas

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 (C2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), se tiene registrado un volumen de extracción de **5.4 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022. De los cuales 1.2 hm³ (22.2%) son para uso público-urbano y 4.2 hm³ (77.8%) corresponden al uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2015-2019, en un área de balance de **139 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:

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 (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información 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:

$$\mathbf{Rv + Ri + Eh - B - Sh - Dfb - ETR = \pm \Delta V(S)} \quad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Ri: Recarga Incidental

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

Dfb: Descarga por flujo base de ríos

ETR: Evapotranspiración

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

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

$$R_v = Sh + B + D_{fb} + ETR - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del 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:

$$Q = T * B * i$$

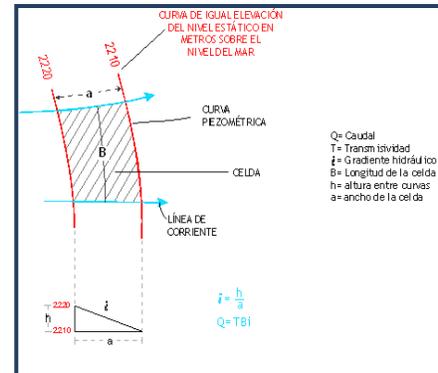
Donde:

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 **8.6 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo 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	1752	1014	10	0.0099	0.0005	0.0086	0.3
E2	2585	648	10	0.0154	0.0008	0.0319	1.0
E3	1036	1630	10	0.0061	0.0050	0.0318	1.0
E4	3880	850	10	0.0118	0.0010	0.0457	1.4
E5	1643	1038	10	0.0096	0.0020	0.0317	1.0
E6	888	1052	10	0.0095	0.0020	0.0169	0.5
E7	1751	1478	20	0.0135	0.0010	0.0237	0.7
E8	1446	1030	10	0.0097	0.0020	0.0281	0.9
E9	1006	886	20	0.0226	0.0020	0.0454	1.4
E10	1184	617	10	0.0162	0.0005	0.0096	0.3
E11	1280	2524	10	0.0040	0.0005	0.0025	0.1
TOTAL							8.6

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.

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se considera que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en las zonas agrícolas, menor de 10 m, y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 4.2 hm³ al aplicar el 20% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 0.8 hm³. Por tanto, **Ri = 0.8 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), a través de salidas por flujo subterráneo (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros y por flujo base de ríos (Dfb).

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 2017, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **0.7 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2017)

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	722	2495	5	0.0020	0.0150	0.0217	0.7
TOTAL							0.7

7.2.2. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **5.4 hm³ anuales**.

7.2.3. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, el Río Verde presentó un caudal estimado de 32 lps de flujo base, que representan un volumen de 1.0 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dfb = 1.0 hm³ anuales**.

7.2.4. 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, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 21.5 °C y 610 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 579.3 mm anuales, como se muestra a continuación:

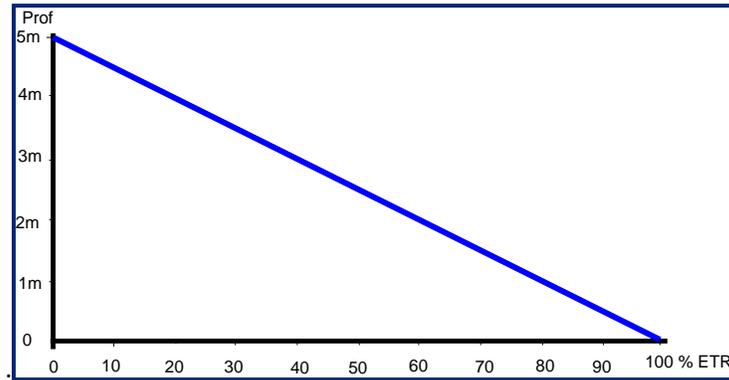
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	21.5		
P(mm) =	610	P ² =	372100
L =	1334.41875	L ² =	1780673.4
ETR (mm)	579.3		

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 cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 5.1 hm³/año.**

Tabla 4. 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	3	15.8	0.5793	0.4	3.7
4	4	5.3	0.5793	0.2	0.6
5 a 3	4	6.5	0.5793	0.2	0.8
Total		27.6		TOTAL	5.1

7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2015-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.03$ se determinó la variación del 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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo analizado es de -6.9 hm^3 , es decir, un promedio anual de -1.7 hm^3 .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2015-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-6	-6.0	2.4	0.03	-0.4
-3	-3	27.2	0.03	-2.4
-1 a -3	-2	53.7	0.03	-3.2
0 a -1	-0.5	60.5	0.03	-0.9
TOTAL		143.8	TOTAL	-6.9
		Promedio anual		-1.7

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:

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

$$R_v = 0.7 + 5.4 + 1.0 + 5.1 - 8.6 - 0.8 - 1.7$$

$$R_v = 1.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + Eh + Ri$$

$$R = 1.1 + 8.6 + 0.8$$

$$R = 10.5 \text{ hm}^3/\text{anuales}$$

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 incidental. Para este caso su valor es **10.5 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, prevenir la migración de agua de mala calidad al acuífero.

Para el caso del acuífero Río Verde-Ejutla su valor es **1.0 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga del flujo base del río Verde. No se considera comprometido el volumen de las salidas por flujo horizontal porque éstas fueron evaluadas en la entrada al cañón del Río Verde que comunica con el acuífero Jamiltepec, aproximadamente a 5 km de límite entre estos acuíferos, donde no fueron contempladas como entradas y porque no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento aguas abajo. Por lo tanto, **DNC= 1.0 hm³/año**.

8.1. 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 **11'969,008 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**.

8.3. 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 aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 10.5 - 1.0 - 11.696008 \\ \text{DMA} &= - 2.196008 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de **2'196,008 m³**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2001. Estudio de actualización geohidrológica del acuífero de Valles Centrales, estado de Oaxaca. Realizado por COPEI Ingeniería, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en acuíferos del estado de Oaxaca, acuífero Río Verde-Ejutla. Realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Información piezométrica del acuífero Río Verde-Ejutla, estado de Oaxaca

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Estudio hidrogeológico en los valles de Etlá y Zimatlán para determinar las fuentes recomendables para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Oaxaca. Realizado por PROYESCO, S. A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1984. Estudio de evaluación del valle de Zimatlán, estado de Oaxaca. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA).

Servicio Geológico Mexicano, 2010. Carta Geológica-Minera Ejutla de Crespo E14-D67. Escala 1:50,000.