

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO PEROTE ZALAYETA (3004), ESTADO
DE VERACRUZ**

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. Provincia fisiográfica	6
3.2. Clima	7
3.3. Hidrografía.....	9
3.4. Geomorfología	9
4. GEOLOGÍA	10
4.1 Estratigrafía	12
3.2 Geología estructural.....	26
3.3 Geología del subsuelo	28
5. HIDROGEOLOGÍA.....	29
5.1 Tipo de Acuífero	29
5.2 Parámetros hidráulicos.....	29
5.3 Piezometría.....	29
5.4 Comportamiento hidráulico	30
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	30
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	31
5.4.3 Evolución del nivel estático	32
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	33
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	34
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	34
7.1 Entradas.....	35
7.1.2 Recarga vertical (Rv)	35
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	35
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	37
7.2 Salidas	37
7.2.1 Bombeo (B).....	37
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	37
7.2.3 Descarga de Manantiales (Dm)	38
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	38
8. DISPONIBILIDAD	39
8.1 Recarga total media anual (R)	39
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	40
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	40
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	40
9. BIBLIOGRAFÍA	42

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 Perote-Zalayeta, definido con la clave 3004 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-occidental del Estado de Veracruz, entre las coordenadas 19° 21' y 19° 52' latitud norte y 97° 06' y 97° 26' longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,016 km².

Limita al norte con los acuíferos Martínez de la Torre-Nautla y Tecolutla; al este con Valle de Actopan y Jalapa-Coatepec; al sureste con el acuífero Costera de Veracruz, todos ellos pertenecientes al Estado de Veracruz; al sur y oeste con el acuífero Libres-Oriental, del Estado de Puebla (figura 1).

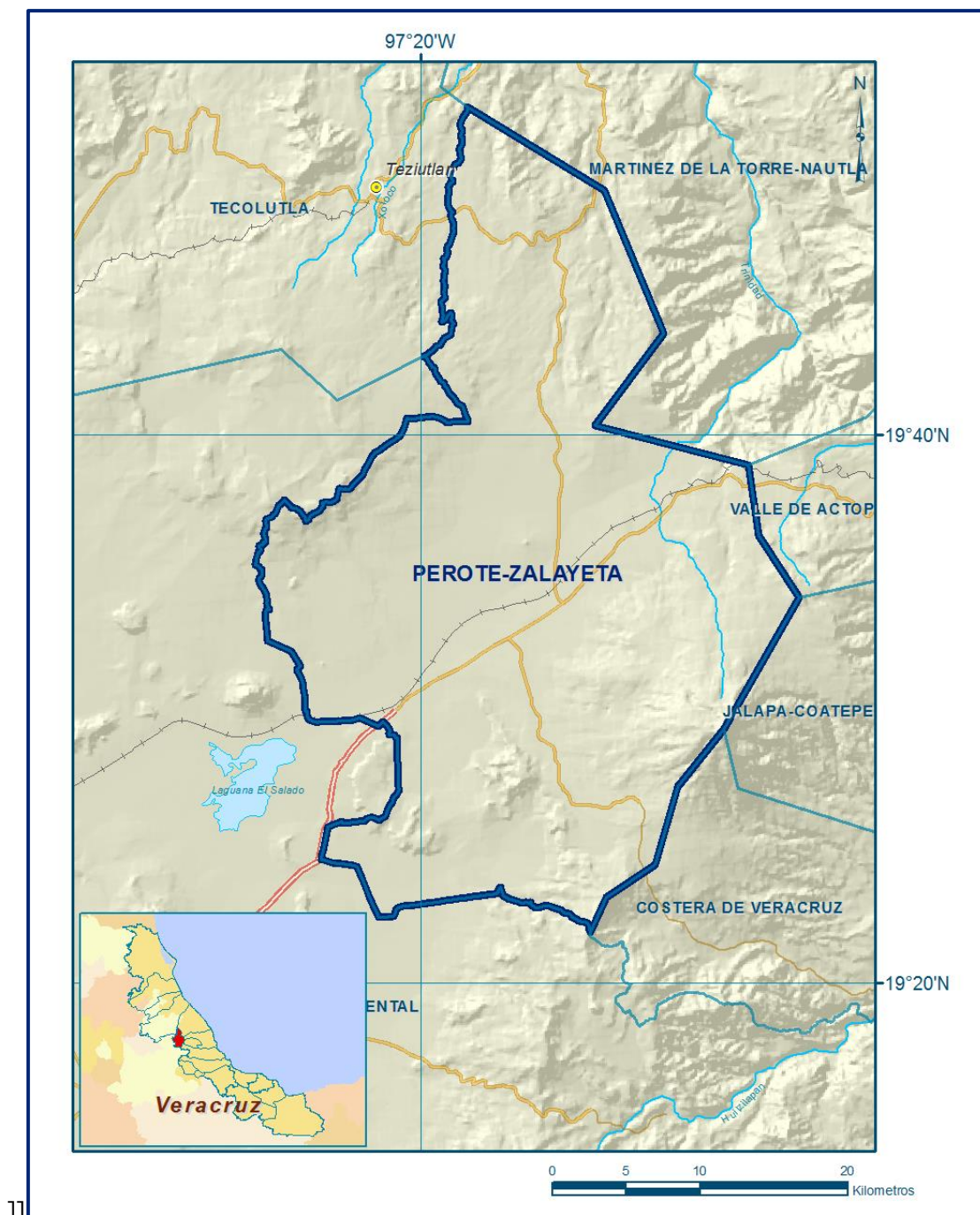


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende casi en su totalidad los municipios Perote, Jalacingo y Villa Aldama; parcialmente los municipios Ayahualulco, Atotonga y Xico; así como porciones menores de Las Vigas de Ramírez, Atzalán y Las Minas.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita al acuífero

ACUIFERO 3004 PEROTE-ZALAYETA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	19	53.3	19	42	52.3	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	97	18	18.2	19	51	56.1	
3	97	13	18.3	19	48	54.7	
4	97	11	8.1	19	43	42.1	
5	97	13	39.6	19	40	19.3	
6	97	8	2.8	19	38	52.9	
7	97	7	41.6	19	36	19.6	
8	97	6	12.3	19	34	2.7	
9	97	8	56.4	19	29	14.4	
10	97	10	38.1	19	27	9.1	
11	97	11	27.2	19	24	19.6	
12	97	13	13.3	19	23	7.5	
13	97	13	49.4	19	21	51.9	DEL 13 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	97	19	53.3	19	42	52.3	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Perote-Zalayeta pertenece al Organismo de Cuenca X “Golfo Centro”.

Su porción norte pertenece al Consejo de Cuenca Río Tuxpan al Jamapa, instalado el 12 de septiembre de 2000; en tanto que su región sur pertenece al Consejo de Cuenca Río Balsas, instalada el 26 de marzo de 1999.

El acuífero se encuentra parcialmente vedado; la porción sur y occidental se encuentran regidas por el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de la cuenca cerrada denominada Oriental, en los estado de Puebla y Tlaxcala”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de agosto de 1954.

Esta veda es de tipo III, en el que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la superficie restante no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

La superficie no vedada del acuífero Perote-Zalayeta, clave 3004, se encuentra sujeta a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El principal usuario es el agrícola. En su territorio no se existe ningún Distrito de Riego y a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En su porción suroriental, en los límites con los acuíferos Jalapa-Coatepec y Costera de Veracruz, se encuentra el Parque Nacional Cofre de Perote, con fecha de decreto 4 de mayo de 1937.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE CORRESPONDIENTE A LA LOCALIDAD DE TOTALCO, MUNICIPIO DE PEROTE, VERACRUZ. Realizado en 1982 por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. para la Dirección General de Asentamientos Humanos y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Veracruz. Su objetivo, como su nombre lo indica, fue identificar los sitios adecuados para la perforación de pozos para abastecimiento de agua potable.

Determina las condiciones geohidrológicas del área y analiza la calidad del agua superficial y subterránea, para proponer su aprovechamiento.

INFORME GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE PEROTE, VERACRUZ. Realizado por la Residencia de Geohidrología de la Delegación en Veracruz, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1985. Define la estratigrafía de la región y con base en el análisis de la información de los aprovechamientos, propone sitios para la perforación de pozos exploratorios que permitan conocer la geología del subsuelo, la posición de los niveles del agua subterránea y su comportamiento.

Realiza sondeos geofísicos, censo de aprovechamientos y define la calidad del agua en función de su conductividad eléctrica y el contenido de algunos elementos como el cloro, calcio y magnesio.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ACUÍFEROS PEROTE-ZALAYETA, EN EL ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en el 2013 por TLÁLOC Ingeniería, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

De sus resultados se determinarán las causales de interés y de utilidad pública señaladas en la Ley de Aguas Nacionales, para establecer la medida regulatoria que proceda. Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Raisz, 1964, el área se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico.

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas del INEGI (1981), la superficie cubierta por el acuífero se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica X Eje Neovolcánico, la mayor parte en la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac; su extremo norte se localiza en la Subprovincia Chiconquiaco

El Eje Neovolcánico abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente.

La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico", integrado por los volcanes de Colima, Tancítaro, Zinaltécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19. Representan el trazo de la gran Falla Clarión.

En el estado de Veracruz se extiende casi hasta a la línea de costa en el Golfo de México, cerca de los conos de tezontle llamados Los Atlixcos. El conjunto fisiográfico de serranías presenta dos sistemas de elevaciones; la primera ubicada al oeste, en donde se observan cumbres que alcanzan 4,250 msnm y la segunda en la porción media cuenta con una ancha cima cónica que alcanza una altura de unos 2,000 msnm; en la región de Xalapa-Naolinco quedan unidas para formar un solo macizo montañoso que separa a las unidades geomorfológicas de las llanuras Costera Veracruzana y del Golfo Norte.

La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas, mientras que en la subprovincia Chiconquiaco las topoformas observadas están asociadas con lomeríos, que pueden ser clasificados en lomeríos suaves, lomeríos suaves con cañadas y lomeríos de colinas redondeas con mesetas.

3.2. Clima

Con base en la clasificación de climas elaboradas por W. Köppen, modificada por E. García, para las condiciones de la República Mexicana, en la superficie del acuífero está representada una variación de climas que depende en gran medida de las elevaciones topográficas.

De esta manera, en las regiones de mayor elevación topográfica se presentan climas templados y fríos, conforme se desplaza a la porción centro y occidental el clima cambia gradualmente a templado subhúmedo y semiseco templado.

El clima con mayor cobertura espacial es el de tipo semiseco templado (BS1k'w) con influencia en la zona centro suroeste del acuífero. Hacia el este en el sector adyacente del Cofre de Perote predominan los climas fríos (C(E)(m) y E(T)H) y el semifrío subhúmedo (C(E)(w2)(w)), dependiendo de la altura topográfica.

Por su parte los climas templados subhúmedos (C(w0)(w), C(w1)(w) y C(w2)) y húmedos (C(fm) y C(m)) se distribuyen en la porción centro, centro-poniente y norte del acuífero.

En particular la zona del Cofre de Perote, tiene un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano.

La temperatura media anual que se registra en la totalidad del territorio es de 14 a 16 °C; en tanto que la precipitación promedio anual tiene varias franjas de registro, la mayor zona, ubicada hacia el sureste y el centro tiene un promedio inferior a los 400 mm, lo que lo hace la zona más seca del estado de Veracruz, le siguen en forma concéntrica hacia el este y el norte, franjas sucesivas donde el promedio varía de 400 a 500 mm, de 500 a 600 mm, de 600 a 700 mm y finalmente se incrementa 1,500 a 2,000 mm en la zona de mayor elevación topográfica.

La precipitación varía en toda la superficie del acuífero en un rango amplio que depende de las variaciones topográficas, los valores más altos se registran en la región montañosa y los menores hacia el centro del acuífero.

Las lluvias más intensas se registran en el periodo comprendido de junio a septiembre. Respecto a la temperatura los valores extremos varían entre 5.6 y 17.6°C. En la región montañosa se registran valores bajo cero en la época invernal.

Las temperaturas más altas se presentan de abril a agosto y las más bajas durante diciembre y enero. El régimen presenta, en términos generales, dos periodos de ocurrencia uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales menos significativas que abarca de noviembre a febrero cuando la región es afectada por los frentes fríos.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 17 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Cuahtamingo, Los Pescados, Orilla del Monte, Perote, Frijol Colorado, Jalacingo, Tenextepéc, Totalco, Zalayeta, Alchichica, El Progreso, Guadalupe Buenavista, Tembladeras, Puente Enríquez, Francisco I. Madero, Las Margaritas y Los Humeros.

Con los registros obtenidos para el periodo 1951-2010 y utilizando el método de isoyetas, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **633 mm y 12.7 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1536 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en territorio de tres Regiones Hidrológicas: la mayor parte de él se localiza en la Región Hidrológica 18 “Balsas”, cuenca Río Atoyac; la región norte pertenece a la Región Hidrológica 27 “Norte de Veracruz”, cuenca Río Nautla y Otros; sólo una pequeña área de la porción oriental se ubica en la Región Hidrológica 28 “Papaloapan”, cuenca Río Jamapa y Otros.

De la Región Hidrológica Balsas, Subregión Hidrológica “Alto Balsas, en la región que cubre el acuífero sólo se localizan algunos escurrimientos que desembocan al Lago Totolcingo o El Carmen. De la Región Hidrológica Norte de Veracruz la corriente superficial más importante es el Río Bobos.

En la Región Hidrológica Papaloapan, cuenca del Río Jamapa y Otros, los ríos Sedeño, Sordo, Chico, Tlacuilolan, Caracol, Calpixcan, Gavilán, Huehueyapan y Texolo son sus corrientes tributarias principales, que se unen para formar el Río Los Pescados hasta desembocar en el Golfo de México, con una dirección preferencial hacia el sureste.

Otros arroyos son los denominados Chorreados, Atexcatl y Potrero, entre otros, los cuales en algunas áreas se unen con otros ríos que se originan en el Cofre de Perote, a una elevación que varía de 3,000 a 3,400 msnm. El relieve físico hace que los principales ríos de la región tengan un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado, en algunas partes de la porción occidental el escurrimiento es de tipo subparalelo.

3.4. Geomorfología

El relieve del acuífero se caracteriza por sierras, lomeríos y lomeríos con colinas redondeadas con mesetas y cañadas.

Hacia la porción occidental, puede observarse mesetas disectadas por cañadas, bordeadas por los conos volcánicos conocidos como Cofre de Perote, Cerro de Las Vigas y la antigua caldera del Cerro de Aldama, además de la presencia de conos escoriáceos como el de Naolinco y diversos abanicos volcánicos.

Las sierras se presentan abruptamente disectadas por profundas barrancas que han sido labradas por los ríos y arroyos; ocupan una región extensa en la porción occidental del acuífero donde se ubica el Cofre de Perote; estructura volcánica definida como un estratovolcán aislado con una altura de 4,250 msnm.

El área de la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se distingue por una morfología de planicies volcánicas con barrancas profundas y sierras entre las que destaca un estratovolcán aislado, mientras que en la pequeña área de la subprovincia Chiconquiaco las topoformas observadas están asociadas con lomeríos, que pueden ser clasificadas en lomeríos suaves, lomeríos suaves con cañadas, lomeríos de colinas redondeas con mesetas y planicies volcánicas con barrancas profundas.

Los lomeríos redondeados con meseta se caracterizan por la presencia de mesetas basálticas alargadas, orientadas NW-SE, que muestran escarpes también denominados colapsos volcánicos, ubicados en el límite sur y suroccidental del acuífero. Presentan una elevación máxima de 2,700 msnm y de 2,350 msnm en sus porciones más bajas, descendiendo desde el noroeste hacia el sureste.

Este sistema es disectado por algunas corrientes que dan origen a valles en forma de "V", aunque en las áreas de colapsos volcánicos, se amplían para formar zonas relativamente planas, delimitadas por lo general por paredes o escarpes verticales.

Lomeríos con cañadas se presentan al norte del acuífero, las cañadas presentan profundidades mayores a 100 m, que han sido labradas por la acción de las principales corrientes superficiales en un desarrollo del tipo paralelo. El rango de elevación topográfica de este sistema varía de 2,300 y 1,500 msnm.

4. GEOLOGÍA

Las rocas más antiguas corresponden al Esquisto Chililis, que conforma el basamento del terreno Maya (Campa U.M.F. et al., 1983) y consta de esquistos de muscovita, filita, cuarcita y meta-lava con edad mínima de metamorfismo de 280 Ma (Pérmico Inferior), obtenida por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Figura 2.

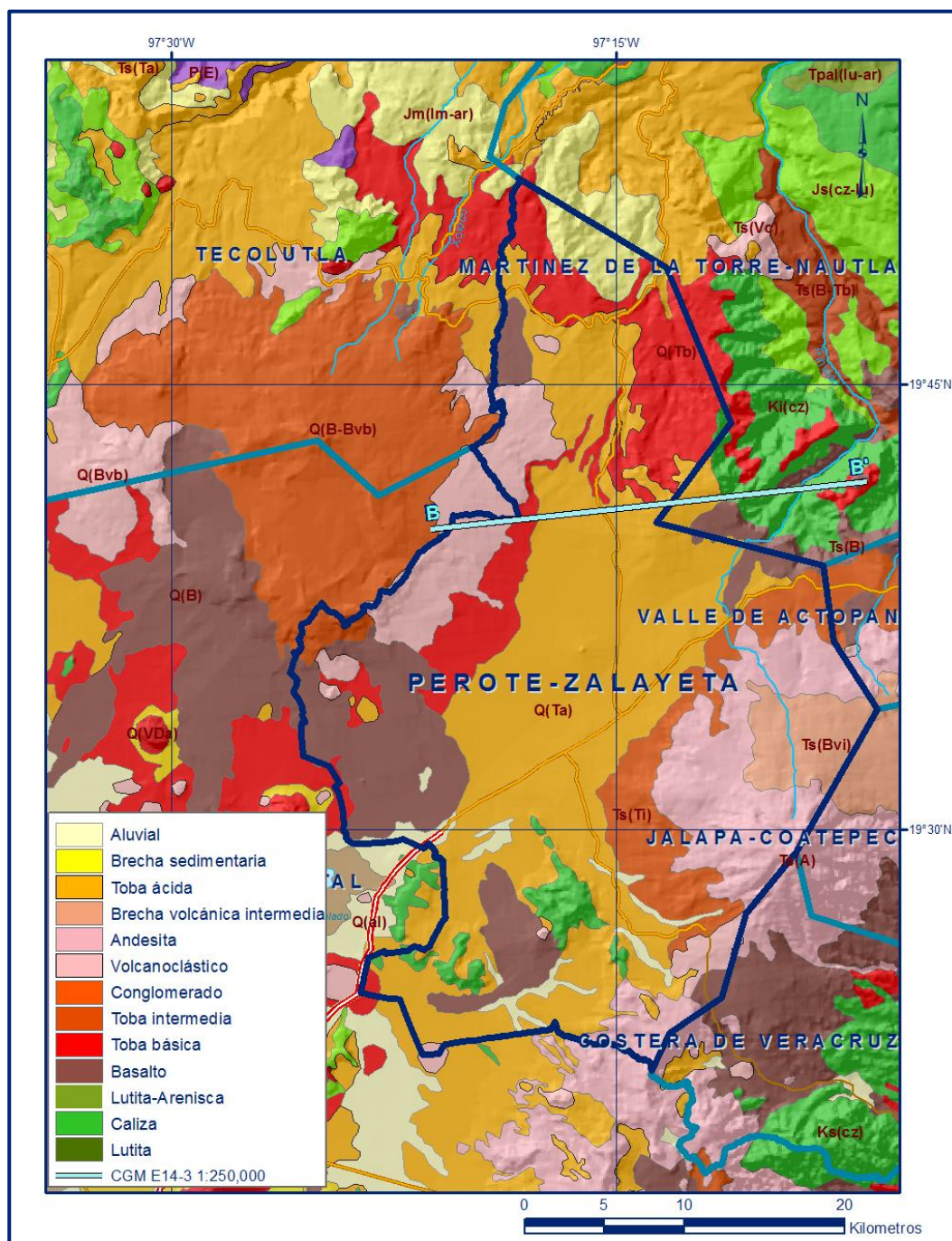


Figura 2. Geología general del acuífero

Afectando a esta unidad se tiene granitos y granodioritas, con edades de 268.14 ± 0.67 Ma (Pérmico), también obtenida por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. La cobertura mesozoica de este terreno está conformada por la cuenca Sierra Madre Oriental y Cuenca de Zongolica; así mismo la cobertura cenozoica comprende varios elementos del Eje Neovolcánico como son el vulcanismo pliocénico (andesita Teziutlán), la Caldera de Los Humeros y los campos volcánicos Cofre de Perote y La Joya.

De la Cuenca Sierra Madre Oriental se tiene a la Formación Cahuasas, de edad Bajociano-Bathoniano que consiste de limolita, arenisca y conglomerado polimíctico. La Cuenca de Zongolica está representada por calizas y dolomías de la Formación Orizaba, de edad Albiano-Cenomaniano.

La unidad más antigua del Eje Neovolcánico es la Andesita Teziutlán, del Plioceno, constituida por andesitas y tobas andesíticas, que cubren discordantemente a las unidades anteriores y sobre la cual se edifican los campos volcánicos presentes en la región.

El Campo Volcánico Cofre de Perote que consiste de tobas andesíticas y andesitas, de edad Plioceno-Pleistoceno, y en la parte superior, conformando el conducto del aparato volcánico, se tienen domos de andesita de edad Pleistoceno.

El Campo Volcánico La Joya consiste de derrames de basalto del Pleistoceno Tardío al Holoceno, así como derrames de basalto del Holoceno Temprano y como último evento piroclastos de composición basáltica del Holoceno (Carta Geológico-Minera Perote E14-B26.Escala 1:50000. SGM, 2007).

4.1 Estratigrafía

La columna geológica de la zona está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Triásico al Reciente.

Las rocas más antiguas der la región afloran en la porción norte del área y son consideradas parte de un complejo basal, cuya edad varía del Pérmico Tardío al Jurásico Temprano. Algunas de ellas están cubiertas por rocas sedimentarias continentales del Triásico Superior y del Jurásico Inferior y Medio, y otras por rocas sedimentarias marinas del Jurásico Superior y del Cretácico.

La intensa actividad ígnea casi exclusivamente volcánica, está representada con gran amplitud en toda la región; al parecer se inició a fines del Mioceno y duró hasta el Reciente, enmascarando los rasgos estratigráficos y estructurales de las rocas subyacentes.

A continuación, se describen las distintas unidades litológicas que conforman la columna estratigráfica de la región, de la más antigua a la más reciente, aunque algunas de ellas no afloran en la superficie del acuífero:

PÉRMICO TARDÍO-JURÁSICO TEMPRANO

Complejo Basal

Está constituido por una serie de rocas ígneas y metamórficas de composición granodiorítica y esquistosa, sobre la cual descansan los sedimentos del Mesozoico.

Los afloramientos de estas rocas forman el núcleo que estuvo emergido durante el Mesozoico. Aflora principalmente a 15 km al sur de Tlapacoyan, Veracruz; en la presa La Soledad en Mazatepec.

En la margen meridional montañosa del Río Apulco, en la base de la Sierra de Chignautla y la Sierra de Tezompan, que es la continuación de la primera hacia el sur. En el área del acuífero únicamente aflora en el Río Bobos, en las cercanías de Altotonga, Veracruz.

Las rocas granodioríticas son de color gris claro y oscuro, de grano grueso, con feldespatos, cuarzo, y ferromagnesianos, cuya edad radiométrica determinada por el método K/Ar corresponde al Pérmico Tardío-Jurásico Temprano. Afloran en las Sierras de Chignautla y Tezompan.

Las rocas metamórficas que forman parte de este complejo están representadas por esquistos verdes de cuarzo y muscovitas de color verde oscuro de textura esquistosa, que afloran en las cercanías de la Presa La Soledad en Mazatepec y en el kilómetro 15.5 de la carretera Tlatlauquitepec-Mazapetec.

Cuya edad radiométrica corresponde al Triásico Tardío y representa el último evento de calentamiento que la afectó, debido quizá a la intrusión granodiorítica, por lo que se deduce que los sedimentos que constituyen la roca original fueron paleozoicos.

JURÁSICO

Formación Huayacocotla

Consiste de areniscas de color gris verdoso dispuestas en estratos de 20 a 60 cm, plegados y con estructura de "boudinage", intercaladas con un conglomerado de color verde oscuro conformado por fragmentos de cuarzo y rocas metamórficas, así como con lutitas carbonosas de color gris oscuro. Subyace en forma transicional a la Formación Cahuasas, en tanto que su contacto inferior no se observa.

Formación Cahuasas

Está constituida por limolitas de color rojo, areniscas y conglomerados, dispuestas en estratos de espesor de 20 a 90 cm, cubiertas en forma transicional por un paquete representado por las formaciones Santiago, Tamán y Pimienta. Estas formaciones están agrupadas en una misma unidad debido a que sus litologías son muy similares y por la dificultad para ser cartografiadas.

Están compuestas por calizas arcillosas en capas de 10 a 40 cm alternando con lutitas calcáreas. Presentan clivaje y pliegues sin-sedimentarios, con presencia frecuente de amonitas, radiolarios y bioclastos indeterminados. Aflora únicamente al norte del área, en las cercanías del Complejo Basal, en el Cerro Ocotepec, sobre la carretera que comunica Altotonga con Zapotitlán de Méndez.

Formación Tamán

Definida por Heim en 1926 y después Erben la describe en su localidad tipo Tamán, ubicada en las cercanías de Tamazunchale, SLP. Está constituida por una secuencia de calizas bien estratificadas, de color negro, de grano fino y microcristalinas, con intercalaciones de lutitas negras. Incluyen una alternancia de lutitas calcáreas de color negro, carbonosas, con calizas arcillosas de color gris oscuro, dispuestas en estratos de 40 a 50 cm de espesor; las lutitas se presentan en estratos de 10 a 15 cm de espesor que intemperizan en tonos rojizos.

Se considera una unidad de gran espesor, alrededor de 700 m, en las paleo depresiones; sin embargo, sus espesores disminuyen notablemente hacia las partes altas del paleo relieve, incluso hasta desaparecer.

Subyace en forma concordante y transicional a la Formación Pimienta, observable en superficie y en el subsuelo a través de los pozos petroleros; en algunas localidades sobreyace a la Formación Santiago y en otras llega a cubrir al basamento del Triásico. Presentan estratos de biomicrita, con organismos pelágicos, como radiolarios, equidoermos y *Rhaxella*. Su macrofauna permite establecer su edad, que corresponde al Oxfordiano-Kimmeridgiano. Su depósito ocurrió en las márgenes de una plataforma. Se correlaciona con la Formación San Andrés al sur de la Cuenca de Chicontepec.

Aflora también en Zapotitlán de Méndez y cubre discordantemente al granito de las sierras de Tezompan y Chignautla, en la porción norte del área. Se correlaciona con la Formación San Andrés al sur de la Cuenca Chicontepec.

Formación Santiago

Esta unidad fue propuesta en forma inédita por Reyes (1964 en Cantú-Chapa, 1969) como miembro de la Formación Tamán, a la cual denominó “Lutita Santiago” y propuso la localidad tipo en la ladera oeste del Río Moctezuma (Tamán, San Luis Potosí), cerca de la desembocadura del Arroyo Santiago, del cual se deriva su nombre. Cantú-Chapa (1969) eleva su rango a formación.

Argumentando las marcadas diferencias de litofacies, biofacies y de edad con respecto a la Formación Tamán. Reyes (1964) reconoce un cuerpo de “lutitas calcáreas de color gris oscuro hasta de 40 cm de espesor, intemperiza a café pardo o café rojizo, presentan un clivaje diagonal a los planos de estratificación que a veces dan lugar a apreciaciones erróneas en la medición de los datos estructurales, además poseen nódulos calcáreos intercalados”. Cantú-Chapa (1971) reconoce que la base de la formación está representada por lutitas negras a gris oscuro, muy fracturadas, con nódulos calcáreos de color gris oscuro y capas de caliza cuyos espesores varían de 2 a 10 cm. Su espesor varía de 160 a 190 m.

Formación Pimienta

Definida por Heim en 1926 en la localidad tipo que se encuentra en el Rancho Pimienta, ubicado en el Valle del Río Moctezuma, en el km 337 de la carretera México-Laredo, en donde está compuesta por una secuencia de calizas de color gris oscuro dispuesta en estratos delgados con bandas de pedernal.

Contiene también calizas mudstone-wackestone y calizas arcillosas de color negro a gris oscuro, intercaladas con capas delgadas de lutitas calcáreas y lutitas laminares negras, con abundante materia orgánica; presenta algunos lentes de pedernal negro. Los estratos de carbonatos se distinguen por contener abundantes foraminíferos y un horizonte de aproximadamente 50 cm de espesor de coquinas con abundantes amonitas dentro de las calizas arcillosas de color negro. Aflora únicamente en las inmediaciones del poblado San Miguel Tenextatiloyan, en un corte de la carretera que une a Libres con Oriental, donde se presenta muy plegada, y en otros dos afloramientos en la porción norte del área.

De acuerdo con su contenido faunístico, que incluye especies como *Calpionella alpina*, restos de equinodermos y tintínidos, se determinó que su edad corresponde al periodo Kimmeridgiano-Tithoniano, marcando en su parte superior el Límite Jurásico-Cretácico.

Se infiere que se depositó en condiciones de plataforma con comunicación al mar abierto con importante aporte de terrígenos finos, con cambio litológico hacia la cima que se explica por una variación en las condiciones batimétricas que corresponden a mares someros de baja energía.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Tamaulipas

Nombre definido por Stephenson, J. en 1921 y generalizado por J.M. Muir en 1936. Está representada por calizas que afloran en la Sierra de Tamaulipas. Posiblemente el Cañón de la Borrega, ubicado al oriente de la estación de ferrocarril de Zaragoza sea uno de los lugares más accesibles para estudiarla.

Formación Tamaulipas Inferior

Fue descrita como calizas de estratificación mediana a gruesa, de color gris claro y gris oscuro, con nódulos esferoidales de pedernal y dolomitización en su porción basal, en su localidad tipo ubicada en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas.

En el área del acuífero está representada por tres miembros, que del más antiguo al más reciente son el calcarenítico, el bentonítico y el calcilutítico.

El miembro calcarenítico presenta colores gris, pardo y crema, con escasos pseudoolitos diseminados cuyos núcleos son micro fósiles y granos de cuarzo, así como intercalaciones de capas delgadas de caliza criptocristalina de color gris verdoso a crema claro, el miembro bentonítico está constituido por bentonita de color verde y gris verdoso, con intercalaciones de caliza criptocristalina de colores gris claro y crema; también presenta capas delgadas de caliza de color pardo claro de textura fina, ligeramente arcillosa, en ocasiones hacia la cima se observa la formación de nódulos de pedernal de colores blanco lechoso, pardo y negro.

El tercer miembro está representado por calizas de color crema o calcilutita de colores crema y gris claro de aspecto de porcelana y, con frecuencia, por delgadas capas de lutita bituminosa negra y laminar, capas de caliza ligeramente arcillosa, nódulos de pedernal de color pardo y blanco lechos e intercalaciones de capas de bentonita de color verde claro. Los tres miembros afloran únicamente en la porción noroccidental del área, cubre una gran extensión y están bien expuestos en las barrancas y cañadas labradas por el Río Apulco.

Sobreyace a las calizas y lutitas de la Formación Pimienta, y a su vez está cubierta de manera concordante por los sedimentos de la Formación Tamaulipas Superior. Aunque en el área de Tlatlauquitepec, ubicada al norte fuera del área del acuífero, está cubierta en contacto normal por las calizas arcillosas del Horizonte Otates al que, a su vez, sobreyace la Formación Tamaulipas Superior

Su edad corresponde al Neocomiano en facies de Cuenca. En la región de Poza Rica gradúa lateralmente a la Formación El Abra, de la cual proviene el nombre Tamabra, que corresponde a rocas del Albiano-Cenomaniano y posiblemente parte del Aptiano.

Las rocas de la Formación Tamaulipas Inferior son de las más persistentes en la porción central y este de México y formaron posiblemente parte de la gran Cuenca o Geosinclinal Mexicano Mesozoico. En todas estas regiones su contacto superior está bien limitado por el Horizonte Otates de edad aptiana.

Formación Otates

Es un intervalo arcillo-calcáreo que separa estratigráficamente a las calizas de las formaciones geológicas Tamaulipas Inferior y Superior. Está constituida por calizas arcillosas de estructura laminar ligeramente carbonosas de color gris oscuro, su espesor varía de 6 a 13 m. Su localidad tipo se ubica en el Cañón de Otates situado a 7 km de Agua Nueva, en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas.

Este horizonte llamado también Formación, está representado por calizas arcillosas de color gris, gris oscuro y negro con estratos de espesor muy variable desde unos cuantos cm hasta 0.50 m, intercalados en lutita laminada del mismo color. En ocasiones contiene pedernal negro. En casi todas las localidades es de carácter muy bituminoso. Se correlaciona con la Formación La Peña en el noreste de México.

Formación Tamaulipas Superior

Es una sección de estratos de espesor medio de calizas criptocristalinas de color crema claro, con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal gris. En su secuencia es posible distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema en capas de espesor medio, ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento en capas de espesor delgado con nódulos de pedernal de color gris. Sus exposiciones se presentan en los cañones que cortan la sierra de Tamaulipas y la Sierra Madre Oriental.

Su origen es batial (o de cuenca), de acuerdo con su contenido de amonitas; aflora desde la Sierra de San Carlos, Sierra de Tamaulipas, gran parte de la Sierra Madre Oriental y el subsuelo de los campos de Ébano, Pánuco y SW de Tampico.

Donde gradúa lateralmente a la facies arrecifal de la Formación El Abra. También se encuentra en la región de Poza Rica al norte y al oeste, donde es isócrona con las turbiditas productoras de los campos de Poza Rica, constituyendo la unidad denominada Formación Tamabra.

De acuerdo con su contenido fósil, su edad corresponde al Albiano–Cenomaniano, yace debajo de las calizas de la Formación Agua Nueva y sobre rocas del horizonte Otates. Su espesor es inferior a 400 m y junto con las rocas de la misma edad forman la gran cuenca o geosinclinal mexicano. En el área del acuífero aflora principalmente en la porción central, constituyendo casi en su totalidad las sierras Yolotepec y Tenex-tepec; en esta última se observa un cambio de facies hacia las calizas de la Formación Orizaba

Formación Orizaba

En el área Los Humeros-Las Derrumbadas, las rocas que la constituyen son calizas de tipo arrecifal con abundante fauna bentónica, que representan un cambio de facies de cuenca de la Formación Tamaulipas Superior. Por lo general, se presenta en forma masiva y únicamente en las zonas de transición o cambio de facies se encuentra estratificada; forma grandes bancos con abundantes fragmentos de mega fósiles tales como caprinidos, gasterópodos (turritelas y nerineas), corales y fragmentos de pelecípodo.

Por su microfauna, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Por su naturaleza arrecifal es relativamente fácil distinguir estas rocas de aquellas del Aptiano y Turoniano. Afloran únicamente en tres áreas, la primera se localiza al sureste de Perote, en la región norte de la sierra de Tenex-tepec, mientras que en la región suroccidental se encuentra estratificada como resultado del cambio de facies; en su flanco occidental se observa el talud arrecifal con abundancia de miliólidos y mala estratificación.

La segunda área donde aflora se localiza al pie suroriental de Las Derrumbadas, en las inmediaciones de los poblados Tepetitlán y Paso Nacional, donde es claro el contacto transicional con los sedimentos de la Formación Guzmantla. El tercer afloramiento de mayor importancia, tanto en tamaño como por la posición estructural que guarda, es

la sierra de Soltepec, en las inmediaciones de los poblados Aljibes y San Andrés. La cual continúa hacia el sureste, fuera del área estudiada, mientras que al noroeste finaliza en las cercanías meridionales del poblado Rincón de Zitlaltepec.

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 recrystalizadas. 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.

Se encuentra distribuida de manera muy restringida en la porción suroriental de Las Derrumbadas, constituyendo la sierra La Ventana que está formada en su totalidad por estas rocas, así como en la sierra de Tlachichuca, excepto su punta norte. Su mejor afloramiento se localiza al sureste y está representado por varios montículos rodeados por rocas piroclásticas.

Su contacto inferior con la Formación Orizaba es transicional, mientras que su contacto superior no se observa. Es correlacionable 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

En el área del acuífero está representada por una caliza arcillosa de colores gris oscuro y pardo claro, dispuesta en capas delgadas a medianas que varían de 15 a 40 cm de espesor, con intercalaciones muy delgadas de margas y lutitas arenosas de color gris y gris verdoso, esta última con abundantes ramaleos de calcita y delgadas películas de arcilla roja. Contiene fósiles de radiolarios calcificados, *Globotruncana sp.* y fragmentos de otros foraminíferos mal conservados no identificables, que permiten asignarle una edad correspondiente al Cretácico Superior. Aflora únicamente en la sierrita Loma Virgen, que se localiza entre los poblados de Santa María Coatepec y Aljojuca.

Está cubierta concordantemente por los sedimentos de la Formación Agua Nueva y cubre a su vez, del mismo modo, los sedimentos de la Formación Orizaba. Se presenta en cambio de facies con los sedimentos de las formaciones Agua Nueva y Guzmantla.

Formación Agua Nueva

Nombre introducido por Stephenson (1921) y después por Muir, J. M. (1936) para referirse a los sedimentos que descansan directamente sobre la Formación Tamaulipas Superior. Se distinguen dos unidades; la inferior consiste de capas de estratificación gruesa a media (hasta 0.70 m.), que contienen laminaciones de lutita negra quebradiza. La parte media de la sección es más arcillosa, en delgadas capas de carácter laminar.

Las lutitas negras de esta parte contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La parte superior muestra graduación a rocas de la Formación San Felipe y consiste de calizas de estratificación media y delgada. El espesor de la sección tipo es de 127 m. Se correlaciona con la Formación Indidura del NE de México

Sus relaciones estratigráficas con concordantes tanto con la Formación Tamaulipas Superior que la subyace, como con la Formación San Felipe que la cubre. Se encuentra distribuida en la porción central del área; son mejores afloramientos se localizan en la parte sur de la sierra de Yolotepec, en los pequeños lomeríos frente a la laguna de Alchichica, en las inmediaciones de San Luis Atexcac y al norte, este y oeste de Las Derrumbadas.

Está bien expuesta en la pared oriental de la caldera de explosión El Xalapazco del Barrio y finalmente al noroeste del área, en la punta norte de la Sierra de Tepeyahualco, en los cerros San Martín y Tenextepec y en el cañón del Río Apulco, entre las poblaciones Tlapizago e Ixtacamastitlán.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la ranchería de San Felipe, San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas con manchas ovaladas oscuras que pueden ser debidas a la presencia de algas.

Está constituida por una secuencia rítmica de calizas arcillosas de color gris claro y lutitas calcáreas color café. que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita, que hacia su cima desaparece la presencia

de estratos calcáreos Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante.

Sus afloramientos presentan una gran área de exposición sobre el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en forma de una serie de pequeños anticlinales y sinclinales, así como en el flanco poniente de la sierra de Tamaulipas. En el subsuelo de la planicie costera del Golfo de México cambia de facies con las formaciones Tamasopo, Soyatal e Indidura.

En el área de estudio sus afloramientos se presentan en la porción central, siguiendo una franja orientada en sentido NW-SE y en forma muy local al sur, frente a la Laguna de Alchichica, formando parte de la Sierra de Yolotepec, Cubre en forma concordante a las rocas de la Formación Agua Nueva y está a su vez cubierta en la misma forma por los sedimentos de la Formación Méndez.

La Formación San Felipe se presenta en cambio de facies con las formaciones Guzmantla y Maltrata. Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con las formaciones Parras en el estado de Coahuila, Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Indidura de la cuenca del Centro de México, Guzmantla de la Plataforma de Córdoba y Cuautla de la Cuenca Guerrero-Morelos.

Formación Méndez

Definida por Jeffreys en 1910, es el nombre que se utilizó para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris y café con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe. Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez.

En el área del acuífero está constituida por una serie de lutitas calcáreas de colores gris azulado y café, con fractura nodular y concoidal, que sobreyace a la Formación San Felipe, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales.

Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso laminamiento y pizarrosidad, que origina montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales.

Su espesor promedio es de 300 m y se correlaciona dentro del área de estudio con la unidad arcillo-arenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas).

Se le asigna una edad Campaniano–Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino. Sobreyace en forma discordante a la Formación Tamaulipas y concordante a la Formación San Felipe, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales; subyace concordantemente a la unidad arcillosa del Paleoceno. Sus afloramientos se distribuyen ampliamente en toda la superficie del acuífero.

Está distribuida en diferentes puntos sobre una amplia franja alineada NW-SE: en la Sierra de Tepeyahualco, en pequeños lomeríos al oriente de la Laguna de Alchichica, en un pequeño afloramiento frente al poblado San Andrés Payuca y, por último, en el cañón del Río Apulco, entre los poblados Tlapizago e Ixtacamastitlán. Se encuentra descansando sobre la Formación San Felipe y es correlacionable con los sedimentos de la Formación Mezcala del sur de México

TERCIARIO (PALEÓGENO)

Formación Cruz Blanca

Con este nombre se conoce a una secuencia terrígena bien expuesta en una barranca localizada en las inmediaciones del poblado Cruz Blanca, que se considera su localidad tipo. Está constituida por conglomerados, arenas y arcillas, originados por la erosión y el intemperismo al que estuvo expuesto el paquete de rocas sedimentarias del Mesozoico y las rocas ígneas intrusivas.

Se presenta mal clasificada en la base, hacia la porción central los sedimentos gradúan al tamaño de las gravas, en tanto que hacia la cima están representados únicamente por arenas volcánicas y arcillas, interdigitadas con los sedimentos lacustres recientes, pómez y cenizas. Descansa directamente sobre calizas, rocas ígneas intrusivas y demás rocas antiguas. Por estar constituida por fragmentos de rocas sedimentarias mesozoicas e ígneas intrusivas del Terciario Superior, se considera que tiene una edad entre el Mioceno Inferior y Mioceno Superior

Andesita Alseseca

Las andesitas, con las que se inició la importante emisión de lavas que tuvo lugar en el Terciario Tardío y Cuaternario, caracterizan la región y afloran en el lecho del Río Alseseca, del cual tomaron su nombre.

Las rocas son de color gris oscuro, con fenocristales. Aflora en las inmediaciones del poblado Vista Hermosa y en el Cerro Tecolote, inmediatamente al norte de Cuyoaco, donde se observa una facies dacítica que, por sus relaciones de campo, se consideró perteneciente a esta formación.

Aunque no es posible observar su contacto inferior, por sus relaciones de campo y por su edad radiométrica correspondiente al Mioceno Tardío, se considera que probablemente descansa sobre sedimentos terrígenos provenientes del intemperismo y de la erosión de las calizas mesozoicas, los cuales fueron incluidos en la Formación Cruz Blanca.

Formación Teziutlán

Esta formación volcánica, que toma su nombre de la ciudad de Teziutlán, está constituida principalmente por andesitas y en menor grado por basaltos, cubre una extensión grande entre las sierras altas, sobre las que se localizan los volcanes Cofre de Perote, Pico de Orizaba, Sierra Negra, Sierra Tlaxco y La Malinche.

Otros centros de erupción de estas rocas constituyen el Cerro Buenavista y lo que es ahora el Centro de la Caldera Los Humeros. Su composición varía de andesítica a andesítica basáltica y en algunas localidades se observan rocas dacíticas. Las andesitas basálticas se distinguen por sus fenocristales de plagioclasa, los basaltos por sus fenocristales de olivino en una masa de microlitos de plagioclasa cálcica. Además de que sobreyacen a las calizas mesozoicas, las rocas de esta formación cubren a las rocas de la Formación Cruz Blanca y a la Andesita Alseseca y, a su vez, están cubiertas por la Riolita Oyameles y la Ignimbrita Jaltipan.

CUATERNARIO

Riolita Oyameles

Está conformada por una serie de rocas de composición riolítica, bien representada en la región por domos riolíticos, derrames esferulíticos, vitrófidos riolíticos, traquíticos y riodacíticos, así como tobas riolíticas. Su nombre se adoptó del cerro Oyameles, que constituye el límite occidental de la Caldera Los Humeros.

A las rocas de esta unidad las sobreyacen en forma discordante los derrames de la Formación San Antonio y de la misma forma la subyacen las rocas de la Formación Teziutlán.

Poco antes de que se iniciara la actividad que dio lugar a la emisión de estas rocas, se formó la caldera de explosión Buenavista situada al sur del Cerro Oyameles, ya que los productos de esta actividad la cubren y limitan. Más tarde se generaron varios centros emisores que se distribuyeron formando un anillo que marca aproximadamente los límites de la actual Caldera Los Humeros

Formación San Antonio

Es una serie de derrames de composición andesítica y basáltica de origen post-caldera que se encuentran, por lo tanto en la Caldera Los Humeros.

Están representados por varios centros de emisión emplazados alrededor del anillo central interno, de los cuales el más importante es el Volcán San Antonio. Otros centros emisores son los cerros La Viola, Cacahuatate, Sotoltepec, Llanos del Potrero y Vigía Alta.

Los derrames de esta unidad sobreyacen a la Riolita Oyameles y están cubiertos por los lahares de Las Derrumbadas y los sedimentos lacustres.

Campo Volcánico Los Humeros

Representa el evento volcánico más antigua y corresponde con la erupción de ignimbritas y tobas de composición riolítica, relacionada con el colapso de la caldera Los Humeros, cubierta por paquetes de pumicita y cenizas.

La actividad volcánica más reciente está representada por basaltos de olivino.

Campo Volcánico Cofre de Perote.

En él se aprecian diferentes eventos. Durante la época constructiva se emplazaron tobas andesíticas y andesitas, conocidas con el nombre de Andesita Perote, cuya edad se atribuye al Plioceno-Pleistoceno, que aflora en el extremo occidental del acuífero. Le sigue la emisión de basaltos y escorias basálticas de edad Pleistoceno, denominados Basalto Xalapa.

En la etapa de destrucción parcial del flanco suroriental del Volcán Cofre de Perote se originó el lahar Los Pescados, constituido por fragmentos angulosos y subredondeados de andesitas en una matriz arenosa.

Este lahar se ha diferenciado de otro de la misma naturaleza que afectó el mismo flanco, conocido como Avalancha Xico, constituido por bloques de andesitas de 4 a 6 cm de diámetro en una matriz arenosa.

Campo Volcánico La Joya

Está representado por derrames de basalto del Pleistoceno Tardío al Holoceno Temprano y como último evento piroclastos de composición basáltica del Holoceno.

Ignimbrita Jaltipan

Con este nombre se conoce a una serie de derrames ignimbríticos, localizados principalmente en la periferia norte de la Caldera Los Humeros, que tienen como localidad tipo al poblado de Jaltipan, que ocupa el centro del área donde aflora esta roca y que es el mayor banco de materiales de la zona. Incluye ignimbritas en sus tres estados de piroconsolidación: densa, mediana y sin piroconsolidación.

La ignimbrita de piroconsolidación densa se encuentra en la porción norte del área, entre Altotonga y Tlapacoyan, Veracruz. La ignimbrita de piroconsolidación mediana se extiende por todo el norte de la caldera, entre los poblados de Jalancingo, Zacapoaxtla y Zaragoza, en el estado de Puebla, y también al sureste de la caldera, en el lecho de un arroyo que nace en una sierrita localizada al sur de Perote, así como en las paredes del Xalapazco doble situado el poniente de Colonia Victoria. En cambio a la ignimbrita sin piroconsolidación rodea la caldera y presenta fuertes espesores en su porción norte, entre los poblados Altotonga, Jalancingo, Zacapoaxtla y Zaragoza.

Al sur solo está expuesta en los lechos de los arroyos y también forma parte del pie de monte o talud de la Sierra de Tlaxco, a la altura de los poblados Oriental y Cuyoaco, así como también en el lecho del Río Apulco donde aparece a lo largo de casi todo su cauce; al oriente aflora en los alrededores de las ciudades de Xalapa y Coatepec. La ignimbrita Jaltipan se depositó directamente sobre la andesita Alseseca, andesitas de la formación Teziutlán, Rioluta Oyameles y demás rocas antiguas. Su contacto inferior se observa sólo en los cortes de la carretera, cerca de la ciudad de Teziutlán.

Sedimentos Lacustres

Se localizan principalmente en la cuenca Libres-Oriental y están compuestos desde su base por fragmentos de arenas, limos y arcillas producto de la erosión tan intensa a la que han estado sometidas las calizas y las rocas ígneas intrusivas y extrusivas.

Durante esta etapa de depósito tuvieron lugar diversos periodos de actividad piroclástica, cuyos productos están interestratificados con los sedimentos lacustres. Las lagunas de aguas perennes El Carmen y Tepeyahualco son la evidencia actual de las condiciones que prevalecieron en esa época y que, debido al aporte a veces tan

repentino y abundante de material piroclástico, no sólo ocasionaron el desplazamiento de las aguas sino también su desaparición. Las lagunas mencionadas han quedado restringidas debido a los grandes espesores de material pumítico, ignimbrítico, tobas y cenizas volcánicas que provienen en gran parte de la Caldera Los Humeros.

Depósitos aluviales

Corresponde a una pequeña unidad que aflora en la porción suroriental del acuífero y en los cauces de los ríos y arroyos. Están constituidos por sedimentos de granulometría que varía de gravas, arenas, limos y arcillas; de escaso espesor.

3.2 Geología estructural

Las estructuras presentes en el área del acuífero pertenecen al régimen frágil y están representadas por fallas normales y laterales. Las primeras tienen dos orientaciones preferenciales: NE-SW y NW-SE. Las fallas de orientación NE-SW son Las Minas, Juan Marcos, San Pedro Tepozoteco, Las Pailas, Rinconada, Santa Rita, Plan de Toro, Plan de Toro I, Plan de Toro II y Piedra Parada. Las fallas con orientación NW-SE son las conocidas con el nombre Tenepanoya, El Águila y Plan de Gallos.

Las fallas laterales identificadas son de tipo sinistral y dextral, conforman un sistema con dirección NE-SW con tendencia E-W. Las fallas laterales izquierdas de rumbo NE-SW son El Rincón, Landaco, Pilhuatepec y La Cumbre. La falla lateral derecha de rumbo E-W es Barranca Juan Marcos.

La evolución tectónica se remonta a un arco de edad Pérmico instalado al occidente del supercontinente Pangea, que inicia con un magmatismo calcoalcalino con una cuenca marginal sepultada adyacente al arco, que sufre una serie de plegamientos, levantamientos y erosión originados por la Orogenia Apalachiana, dando origen a los esquistos y metalavas (Esquistos Chililis), que conforman el basamento de metamórfico del Terreno Maya. A fines del Jurásico Inferior se generaron movimientos distensivos, provocando plegamiento y fallamiento inverso; bajo condiciones continentales y marinas se deposita la Formación Huayacocotla, en el Jurásico Medio prevalece el ambiente continental, asociado con vulcanismo, dando lugar al depósito de los lechos rojos de la Formación Cahuasas.

Durante el Berriasiano-Valanginiense el mar cubrió la mayor parte del Golfo de México y tuvo conexiones amplias con el Océano Pacífico.

En el Valanginiano tiene lugar una transgresión cubriendo la parte costera y regionalmente continúa la subsidencia y levantamiento lento del nivel del mar con depósitos de playas deltaicas, interdeltaicas y plataformas en ambientes marinos. En el Hauteriviano-Barremiano temprano predomina el desarrollo de bancos de calizas y lutitas. Durante el Hauteriviano hasta el Aptiano se acumularon depósitos delgados de caliza y evaporitas, rodeadas por arrecifes que gradúan lateralmente a calizas de cuenca de la Formación Tamaulipas Superior.

En el Aptiano tardío la acumulación de carbonatos y desarrollo de bancos de arrecifes se suspendieron abruptamente, debido probablemente al influjo de los sedimentos terrígenos clásticos.

Durante el Cretácico Inferior (Albiano-Cenomaniano), se desarrolló la Plataforma de Córdoba, dando origen al depósito de la Formación Orizaba. Simultáneamente, en facies de cuenca, se depositó la Formación Tamaulipas Superior. En el Cretácico Superior se depositan las formaciones Maltrata, Guzmantla y Atoyac, hacia los bordes de la plataforma, dentro de las cuencas se depositaban las formaciones San Felipe y Méndez; estas condiciones continuaron hasta el Campaniano-Maastrichtiano.

En el Paleoceno y Eoceno Temprano la Orogenia Laramide modificó drásticamente la paleogeografía del flanco occidental de la actual cuenca del Golfo de México, y se desarrollaron depresiones paralelas al cinturón orogénico, que dieron lugar a las cuencas terciarias de Burgos, Tampico-Misantla, Veracruz, Comalcalco y Macuspana, con paquetes sedimentarios muy gruesos sobre inclinaciones continentales y rellenando las partes más profundas de las cuencas.

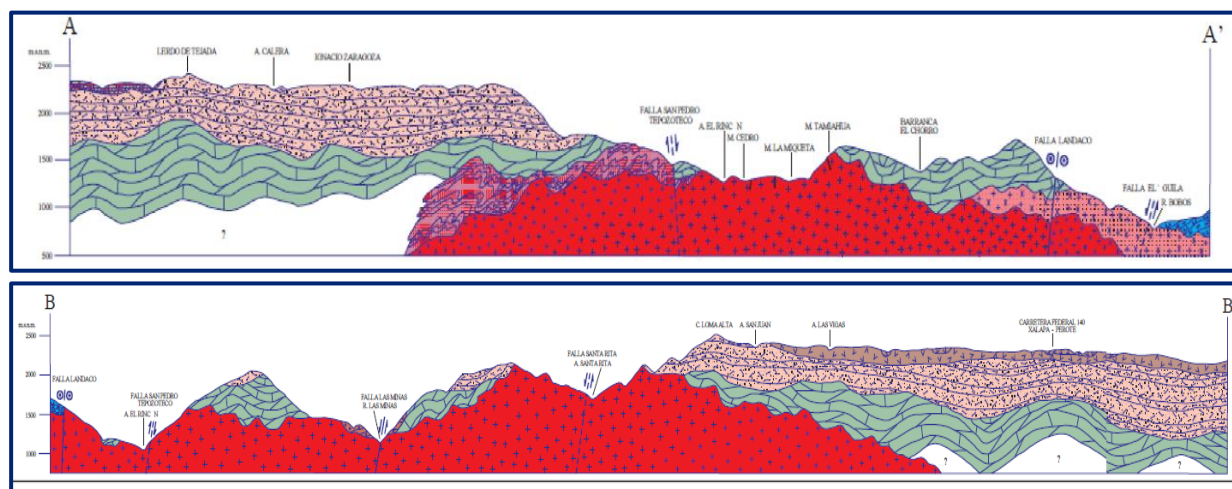
Durante el Mioceno medio se inicia el desarrollo del Eje Neovolcánico que se ha definido como un arco magmático continental, que se extiende desde las costas del Pacífico en San Blas, Nayarit, hasta Palma Sola, Veracruz, en las costas del Golfo de México. Se ha demostrado que el vulcanismo máfico del Mioceno Superior se emplazó desde el Golfo de California hasta el este del Estado de Hidalgo y tiene características geoquímicas típicas de la subducción, aunque su composición es ligeramente variable. En cambio, el vulcanismo de la parte oriental del Hidalgo y norte de Veracruz (Tlanchinol, Tantima, Álamo y buen parte de las mesetas de Palma Sola), presentan características intraplaca.

Hacia el Mioceno Superior, y durante el plioceno temprano, se emplaza la andesita Teziutlán, así como complejos de domos dacíticos y riolíticos y grandes volúmenes de ignimbritas emitidas por las calderas de Los Humeros y Amealco.

El vulcanismo se restablece a los aproximadamente 3.67 Ma con el emplazamiento de centros poli genéticos alineados NNW-SSE (cadena volcánica Cofre de Perote-Pico de Orizaba), sin embargo, la mayor parte del vulcanismo del sector oriental del Eje Neovolcánico se desarrolla durante el Cuaternario. Del Pleistoceno Tardío al Holoceno se originaron flujos de lava y piroclastos pertenecientes al campo volcánico La Joya, con edades por radiocarbono de 43,000 a 870 años (Carta Geológico-Minera Perote E14-B26.Escala 1:50000. SGM, 2007)

3.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, geofísica recabada en el acuífero y la geología superficial, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado en los delgados depósitos aluviales que conforman los cauces de ríos y arroyos, depósitos lacustres, materiales piroclásticos y lahares, así como tobas y basaltos vesiculares. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, entre las que destacan tobas andesíticas, andesitas y en menor proporción conglomerados y areniscas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. (Figura 3.)



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-B26 "Perote" Esc. 1:50 000 (SGM, 2007)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman la secuencia arcillo-calcáreo de las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez.

Las calizas y dolomías de las formaciones Tamaulipas Inferior, Tamaulipas Superior, Orizaba y Guzmantla constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento, debido a que están sobreyacidas por las lutitas, margas y calizas arcillosas de las Agua Nueva, San Felipe y Méndez. Este es un acuífero profundo que aún no ha sido explorado.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, depósitos de lahares y piroclásticos, depósitos lacustres, así como basaltos, en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. La porción superior conforma la unidad hidrogeológica que actualmente se explota, cuyo espesor medio es de 200 m.

Las calizas y dolomías constituyen un acuífero profundo que puede presentar **condiciones de confinamiento** debido a que están cubiertas por lutitas, margas y calizas arcillosas. Esta unidad no ha sido explorada debido a que se localiza a profundidades que pueden alcanzar los 1000 m.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades llevadas a cabo en el estudio realizado en el 2013, se realizaron 14 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales mencionados, se establece que los valores de transmisividad varían en un rango muy amplio de **6.0×10^{-6} a $2.37 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **5.6×10^{-7} a $1.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (de 0.05 a 129.6 m/d)**. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento. Para la estimación del cambio de almacenamiento se adoptó un valor de 0.10.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento piezométrico se cuenta con información correspondiente a 1996 y 2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 muestra que los valores varían de 15 a 160 m. Los más someros, de 15 a 30, se presentan en la porción suroccidental del acuífero. Entre las poblaciones Alchichica y Santa Cruz, desde donde se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el valle. Los valores más profundos, de 120 a 160 m, se registran hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, ubicadas en las porciones norte, noroccidental y oriental, especialmente en esta última que corresponde al pie de monte del Volcán Cofre de Perote (figura 4).

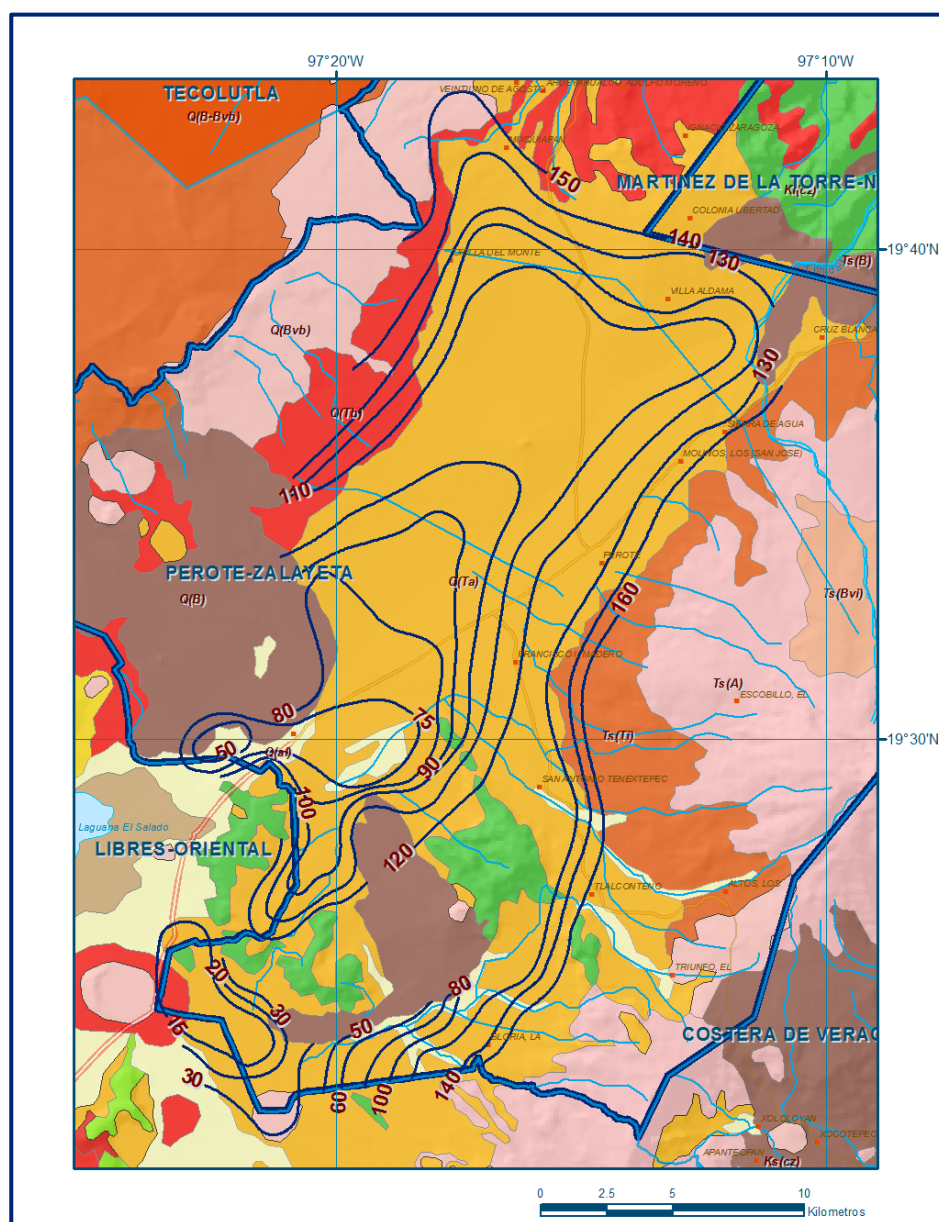


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013 presenta valores que varían entre 2,270 y 2,380 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Los valores más bajos se localizan en la porción sur, entre Santa Cruz y Alchichica, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia los flancos norte y oriental, con salida subterránea hacia el acuífero vecino al sur Libres-Oriental, del Estado de Puebla y hacia las lagunas ubicadas en esta región. En la porción central del acuífero la cuenca es cerrada y muestra una red de flujo concéntrica al centro del valle (figura 5).

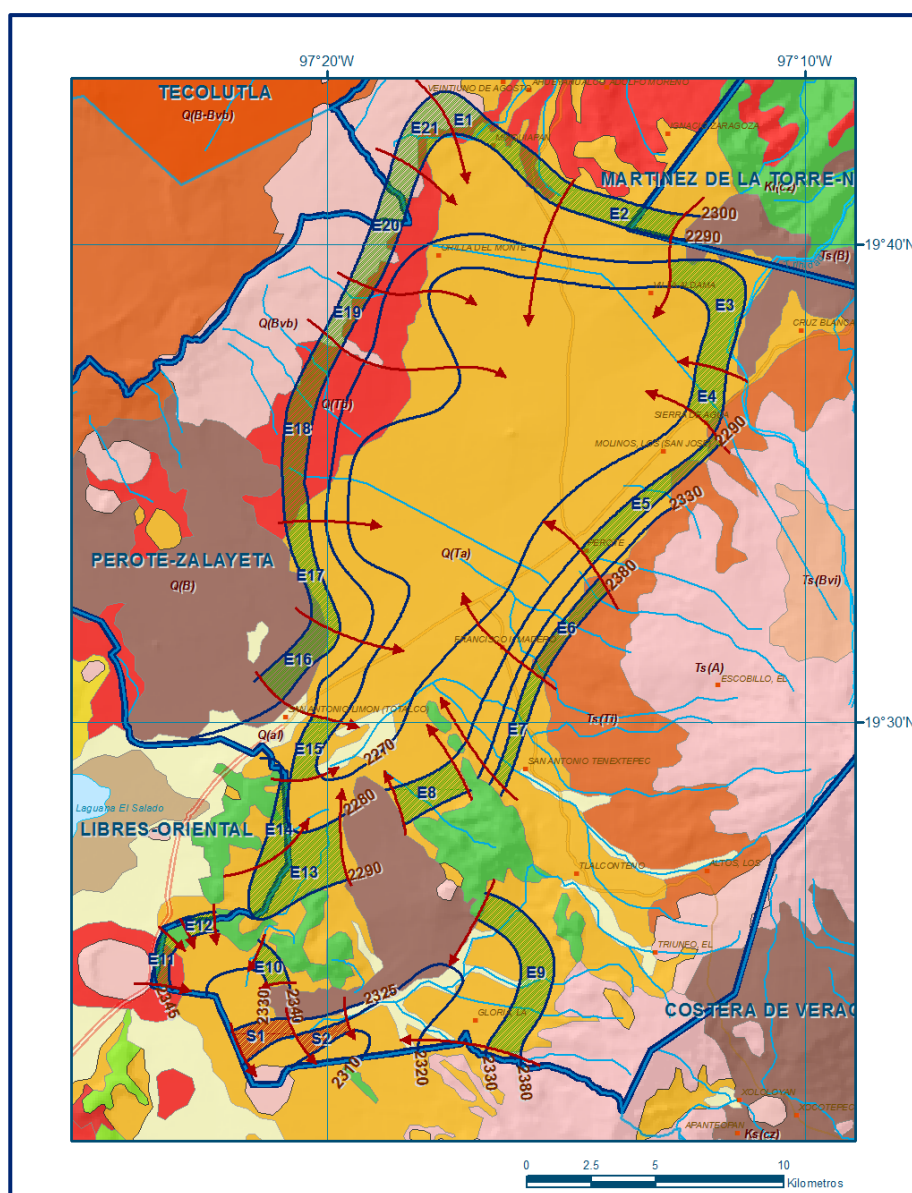


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1996-2013, se registran valores puntuales de abatimiento, de 2 a 5 m, en las porciones centro-norte y sur del acuífero, que es donde se concentra la extracción; en estas zonas el abatimiento promedio es de 2 m para el periodo mencionado, que representa un ritmo anual de 0.1 m. En la mayor parte del acuífero los niveles del agua subterránea no presentan cambios significativos en su profundidad (figura 6). En otras áreas topográficamente más altas, distribuidas en toda la superficie de los valles, se registran recuperaciones de 2 a 3 m en el periodo analizado, que representa 0.15 m anuales.

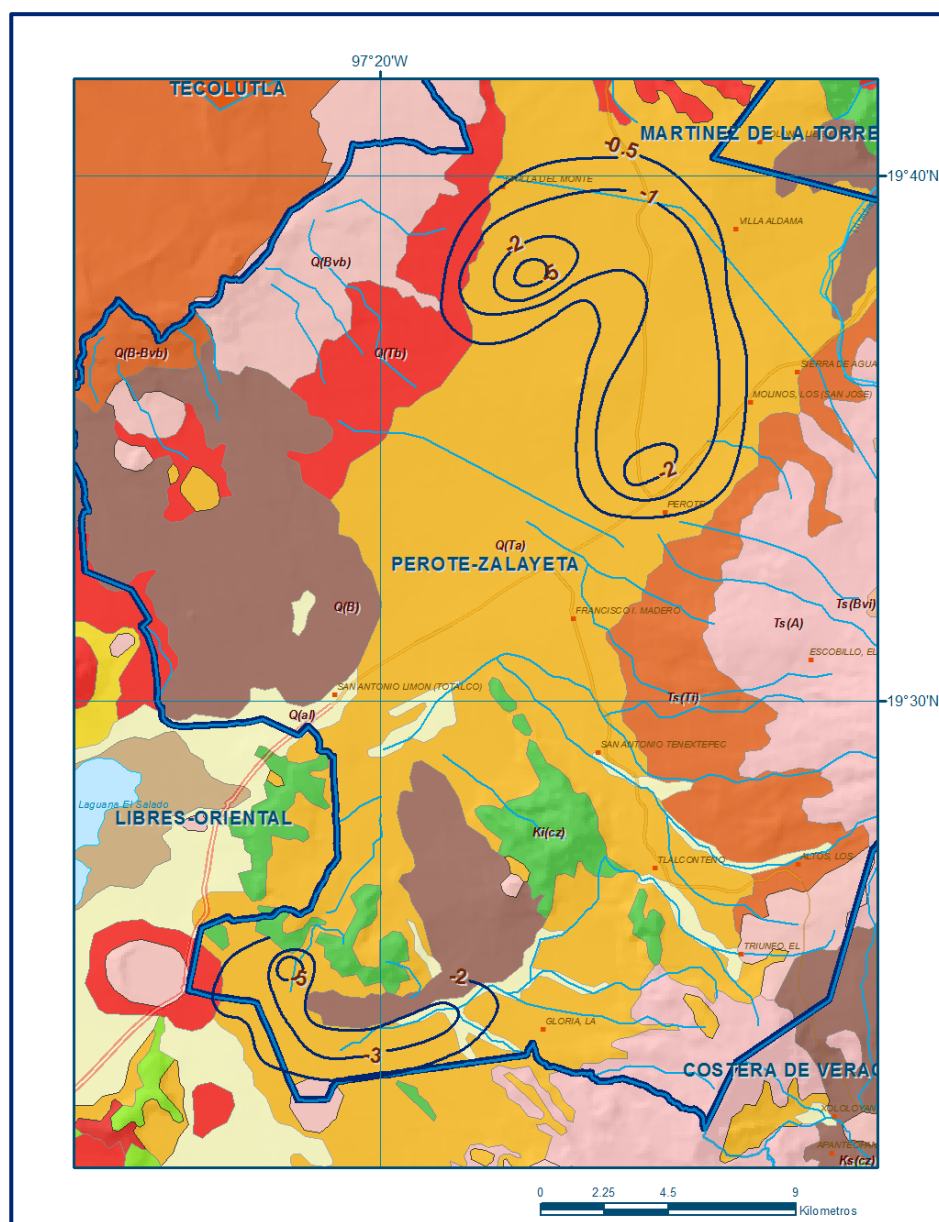


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1996-2013)

Por otra parte, no se observan alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido cambios importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2013, se tomaron 15 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (todos ellos pozos), para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones principales, temperatura, pH), conductividad eléctrica y Sólidos Totales Disueltos (STD), 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 que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 40 a 620 ppm que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido en la modificación a la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. para el agua destinada al consumo humano. Las menores concentraciones se registran en los aprovechamientos localizados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo occidental del acuífero.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 80 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm.}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de pH varían de 7.43 a 8.38 y de temperatura entre 16.4 y 28.0 °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 baja (C_1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), que es apta para el riego agrícola sin restricción alguna. De acuerdo con los iones dominantes, predominan las familias del agua bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas calcáreas y volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el censo de aprovechamientos llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2013, se registraron un total de 192 obras que aprovechan el agua subterránea: 183 pozos, 2 norias y 7 manantiales; del total de obras, 184 están activas y las 8 restantes inactivas; de los aprovechamientos activos 143 se destinan al uso agrícola, 20 (incluidos los 7 manantiales) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 12 para uso doméstico-pecuario, 3 para servicios, 4 para uso industrial y 2 más sin uso identificado.

El volumen de extracción conjunta asciende a **32.9 hm³ anuales**, de los cuales 28.8 hm³ (87.5 %) se utilizan en la agricultura, 2.0 hm³ (6.1%) para uso público-urbano, 1.5 hm³ (4.6%) para uso doméstico-pecuario, 0.4 hm³ (1.2%) para servicios y 0.2 hm³ (0.6 %) para uso industrial.

Adicionalmente, a través de los **7 manantiales** se descarga un caudal de 343 lps, que representa un volumen anual de **10.8 hm³**, destinado al uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1996-2013, en una superficie de **420 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan dispersos la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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 la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) 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 (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y la infiltración de las fugas en los sistemas de distribución de agua potable y de la red de alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero; estos volúmenes se agrupan en la variable denominada recarga inducida (R_i).

7.1.2 Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte

de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

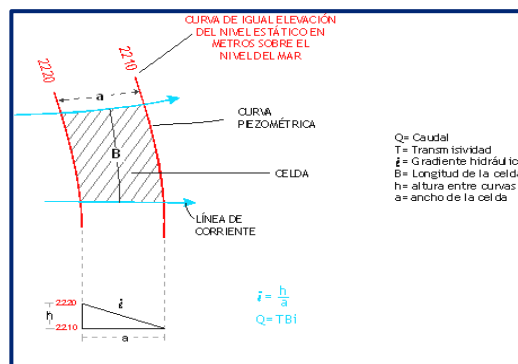
Donde:

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 uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **31.3 hm³/año**.

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	5915	1303	10	0.00767	0.0005	0.0227	0.7
E2	4870	1045	10	0.00957	0.0017	0.0792	2.5
E3	4695	955	10	0.01047	0.0020	0.0983	3.1
E4	2260	1390	10	0.00719	0.0001	0.0016	0.1
E5	6610	630	40	0.06349	0.0001	0.0420	1.3
E6	4870	695	50	0.07194	0.0001	0.0350	1.1
E7	4695	610	50	0.08197	0.0001	0.0385	1.2
E8	2260	1130	10	0.00885	0.0030	0.0600	1.9
E9	6955	1390	50	0.03597	0.0005	0.1251	3.9
E10	1390	870	10	0.01149	0.0010	0.0160	0.5
E11	1305	695	5	0.00719	0.0010	0.0094	0.3
E12	1130	780	5	0.00641	0.0010	0.0072	0.2
E13	3480	1565	10	0.00639	0.0015	0.0334	1.1
E14	3825	870	10	0.01149	0.0015	0.0659	2.1
E15	1740	695	10	0.01439	0.0020	0.0501	1.6
E16	2955	955	10	0.01047	0.0018	0.0557	1.8
E17	4695	1060	10	0.00943	0.0018	0.0797	2.5
E18	6955	870	10	0.01149	0.0010	0.0799	2.5
E19	2260	1045	10	0.00957	0.0010	0.0216	0.7
E20	5215	870	10	0.01149	0.0010	0.0599	1.9
E21	2780	1390	10	0.00719	0.0005	0.0100	0.3
Total entradas							31.3

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2013)

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

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

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

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas. Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al **uso agrícola retorna al acuífero** en forma de recarga inducida, considerando que la profundidad al nivel del agua subterránea en la zona agrícola es mayor de 50 m y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo. El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 28.8 hm³ anuales. Si consideramos que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen **de 2.9 hm³/año** de los excedentes del riego.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas (Sh) y a través de la descarga de manantiales (Dm). No existe flujo base en ríos (Dfb) ni evapotranspiración de niveles freáticos someros (ETR).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **32.9 hm³/año**.

7.2.2 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 del año 2013, mostrada en la figura 5. El volumen total estimado de salidas por flujo subterráneo es de **2.9 hm³ anuales** y se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo salidas subterráneas por flujo horizontal (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2120	1200	5	0.00417	0.0020	0.0177	0.6
S2	2260	610	10	0.01639	0.0020	0.0741	2.3
Total entradas							2.9

7.2.3 Descarga de Manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 7 manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 343 lps, que representan un volumen anual de **10.8 hm³**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución anual del nivel estático 1996–2013. Con base en ella y considerando un valor de rendimiento específico (S_y) de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en un área de balance de 420 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

ΔV = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h = Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 1996-2013 se presentan en la tabla 4. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de 61.9 hm³, que representa un promedio anual de **3.6 hm³/año**

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (1996-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-5	-5	1.0	0.1	-0.5
-3 a -5	-4	8.0	0.1	-3.2
-2 a -3	-2.5	13.0	0.1	-3.3
-2	-2	2.0	0.1	-0.4
-3	-3	1.0	0.1	-0.3
-2 a -5	-4	4.0	0.1	-1.6
-1 a -2	-1.5	39.0	0.1	-5.9
-0.5 a -1	-0.75	34.0	0.1	-2.6
2.5	2.5	318.0	0.1	79.5
Área de balance		420.0	TOTAL	61.9
		Promedio anual		3.6

Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + Dm \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \\ R_v &= 2.9 + 32.9 + 10.8 + 3.6 - 31.3 - 4.2 \\ R_v &= 14.7 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El valor de la recarga vertical incluye tanto a la infiltración de la lluvia que se precipita sobre el valle como a la infiltración que se produce a lo largo de los ríos y arroyos de la región. De esta manera el valor de la recarga total R_t es:

$$\begin{aligned} R &= R_v + Eh + Ri \\ R &= 14.7 + 31.3 + 4.2 \\ R &= 50.2 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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. Para este caso, su valor es de **50.2 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **10.8 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **52,806,416 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 50.2 - 10.8 - 52.806416 \\ \text{DMA} &= -13.406416 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **13,406,416 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio Geohidrológico para actualizar la disponibilidad media anual de aguas subterráneas en el acuífero Perote-Zalayeta, en el Estado de Veracruz. Realizado en el 2013 por TLÁLOC Ingeniería, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.

Gobierno del Estado de Veracruz, Dirección General de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, 1982. Estudio Geohidrológico de fuentes de abastecimiento de agua potable correspondiente a la localidad de Totalco, municipio de Perote, Veracruz. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.