

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ZACAPU (1606), ESTADO DE
MICHOACÁN**

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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	8
3.1. Provincia fisiográfica.....	8
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía	9
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	12
4.2. Geología estructural	12
4.3. Geología del subsuelo	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1. Tipo de acuífero	14
5.2. Parámetros hidráulicos.....	14
5.3. Comportamiento hidráulico.....	15
5.4. Piezometría	15
5.4.1. Profundidad al nivel estático	16
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3. Evolución de nivel estático.....	18
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS.....	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1. Entradas	21
7.1.1. Recarga vertical.....	21
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal.....	22
7.1.3. Recarga inducida	23
7.2. Salidas.....	24
7.2.1. Evapotranspiración.....	24
7.2.2. Bombeo.....	25
7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal	26
7.2.4. Flujo base	26
7.2.5. Salida por manantiales.....	28
7.3. Cambio de almacenamiento	28
8. DISPONIBILIDAD	29
8.1. Recarga total anual (R).....	29
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	30
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DMA)	30
9. BIBLIOGRAFÍA	31

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

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

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

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

1.1. Localización

El acuífero Zacapu, definido con la clave 1606 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 37' y 19° 57' latitud norte y los meridianos 101° 24' y 101° 55' longitud oeste; abarca 1,228 km² de extensión superficial aproximadamente.

Hacia el norte colinda con el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad, al este con Morelia Queréndaro, al sur con Lagunillas Pátzcuaro y al oeste con los acuíferos Zamora y Uruapan, todos ellos del estado de Michoacán (figura 1).

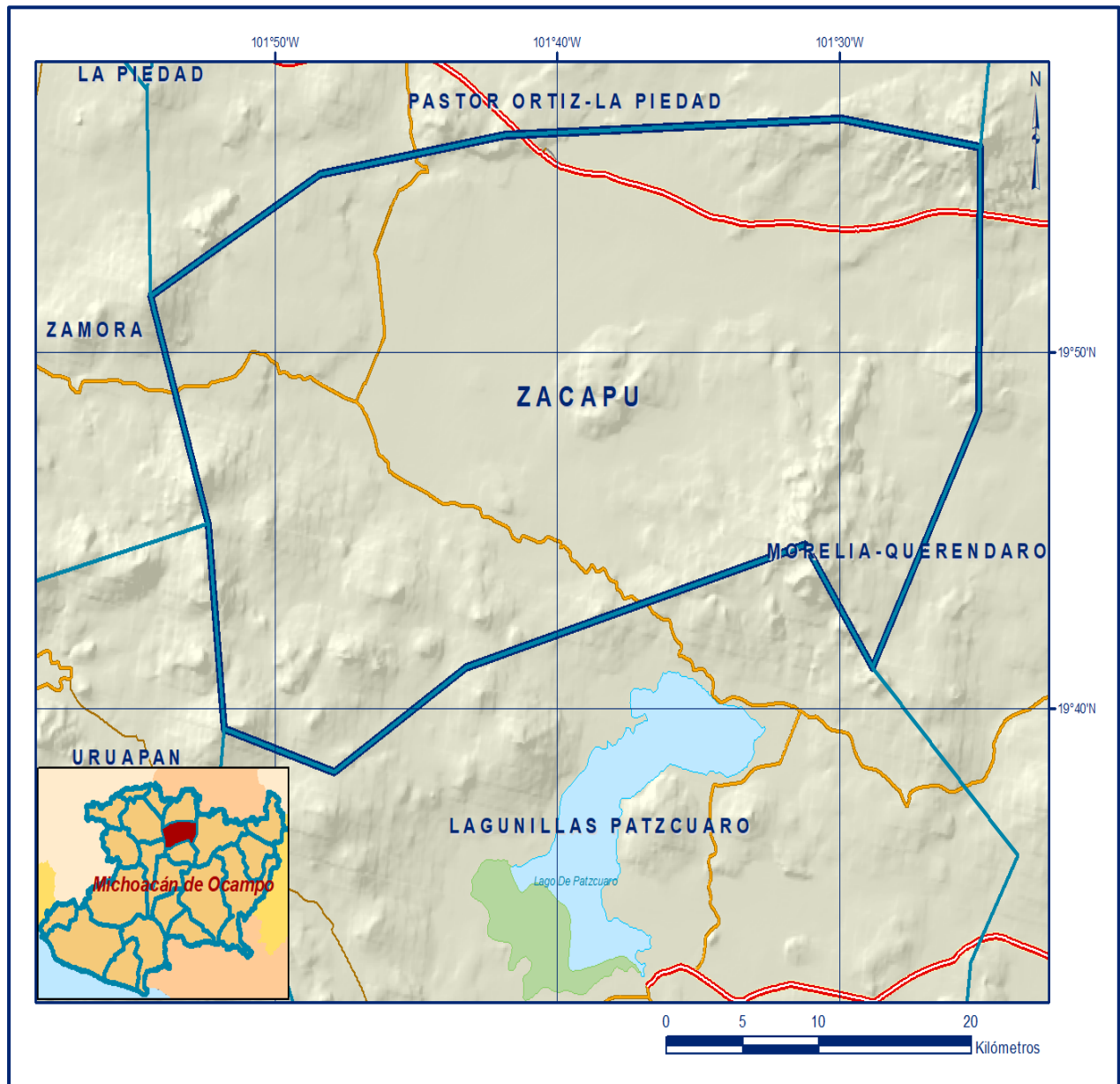


Figura 1. Localización del acuífero.

Cubre gran parte de los municipios Zacapu, Coeneo y Huaniqueo, parte de los municipios de Morelia, Jiménez, Nahuatzén y Quiroga, y una pequeña porción de Chucándaro.

La poligonal 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 el acuífero.

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	101	28	51.1	19	41	9.6
2	101	31	13.3	19	44	35.9
3	101	43	14.2	19	41	8.3
4	101	47	54.4	19	38	12.0
5	101	51	49.2	19	39	26.0
6	101	52	22.6	19	45	11.2
7	101	54	24.8	19	51	35.0
8	101	48	25.1	19	55	0.0
9	101	41	51.8	19	56	6.0
10	101	29	56.6	19	56	34.3
11	101	25	2.0	19	55	45.5
12	101	25	5.2	19	48	19.2
1	101	28	51.1	19	41	9.6

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda, el primero de tipo II y que cubre la mayor parte del territorio se denomina “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del Estado de Michoacán”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de octubre de 1987.

La porción sureste del acuífero se encuentra sujeta al decreto tipo III, denominado “Municipios de Morelia y Charo”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 10 de febrero de 1964. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

Dentro de los límites del acuífero se localiza una parte del Distrito de Riego Rosario-Mezquite; aún no se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios, algunos con información hidrogeológica, con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona. A continuación, se resume cada uno de ellos.

ESTUDIO DE LA CUENCA LACUSTRE TERCIARIA DEL ALTIPLANO MEXICANO. CNA, 1975. Abarca parte del acuífero Zacapu, analiza la extensión y continuidad, las posibilidades hidrogeológicas y potenciales zonas de explotación de los depósitos Terciarios lacustres del Altiplano Mexicano. El estudio comprende recopilación y análisis de información geológica, cartográfica y geohidrológica, así como trabajos de campo consistentes en verificación y toma de muestras de roca para su estudio palinológico y elaboración de la columna lito-estratigráfica general, se inventariaron pozos y manantiales.

Así, se determina que la litología de la zona central y suroeste, que comprende los alrededores del lago Cuitzeo, Zacapu, Ario de Rosales y Uruapan, corresponde a rocas volcánicas producto de intensa actividad volcánica de finales del Terciario e inicios del Cuaternario, tales como derrames y piroclásticos de composición basáltica; por su parte, los sedimentos lacustres se localizan a unos 30 km al oriente de Zacapu.

En general se identifican

- a) Acuíferos en relleno aluvial, depósitos lacustres y fluviales, de tipo libre o semiconfinado, dependiendo de su posición y relaciones estratigráficas en el subsuelo.
- b) Acuíferos en rocas basáltico andesíticas fracturadas, en cuyos contactos con rocas de menor permeabilidad forman manantiales ocasionalmente de gasto considerable.
- c) Acuífero en piroclásticos, tobas y escoria volcánica, materiales que se comportan como un medio granular.

Las fuentes subterráneas resultan aptas químicamente para usarse con fines potables o de riego, tienen baja concentración de sales.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES DE ZACAPU Y PÁTZCUARO, ESTADO DE MICHOACÁN. CNA, 1981. El objetivo central fue evaluar el grado de explotación de los acuíferos, conocer el funcionamiento de éstos, determinar sus mecanismos de recarga y descarga y prestar atención especial a la aportación de las corrientes superficiales.

Se realizó censo de pozos, interpretación foto-geológica, reconocimientos hidrogeológicos de campo, nivelación de brocales, medición de niveles piezométricos, pruebas de bombeo, y muestreo y análisis físico químico del agua subterránea.

Desde el punto de vista geológico el acuífero Zacapu se encuentra ubicado en un graben o fosa tectónica, actualmente cubierta por material clástico no consolidado; geohidrológicamente parece corresponder a una cuenca cerrada, con una salida por Villa Jiménez.

Las unidades litológicas de alta permeabilidad corresponden a basaltos antiguos y recientes, así como a conos cineríticos, que en las zonas montañosas constituyen zonas de recarga. El análisis de la calidad química del agua arroja baja concentración de sales por lo que resulta apropiada para cualquier fin, cumpliendo las normas establecidas para consumo humano.

El flujo subterráneo es radial convergente, proviene de las sierras limítrofes, llega a las zonas bajas y sale en dirección SE-NW, por el poblado Villa Jiménez. Con base en pruebas de bombeo se estima que la transmisividad oscila de 0.52 a $3.91 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

El estudio concluye que la capacidad de aporte excede el volumen descargado, con unos $4.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ de disponibilidad adicional del acuífero. La lámina de lluvia promedio anual es 800 mm, entre 20 y 21° C la temperatura media mensual y del orden de 1753 mm/año la evapotranspiración. Mediante aforos realizados durante el estudio, la descarga de manantiales y por bombeo de pozos y norias resulta 17.12 y $4.89 \text{ hm}^3/\text{año}$ respectivamente.

EXISTEN NUMEROSOS DICTÁMENES DE PROSPECCIÓN REALIZADOS EN DISTINTAS FECHAS Y PARA DISTINTOS POBLADOS Y EJIDOS, POR DIFERENTES DEPENDENCIAS, COMO EL COMAPAS, LOS AYUNTAMIENTOS MUNICIPALES, ORGANISMOS OPERADORES O USUARIOS PARTICULARES. LOS CUALES REPRESENTAN UNA FUENTE MUY VALIOSA DE INFORMACIÓN. Las actividades relevantes de estos dictámenes se circunscriben a sondeos eléctricos verticales de resistividad con diversa abertura AB para distintas profundidades de penetración, a un estudio de correlación geológica, ocasionalmente con análisis de fotos aéreas, y a establecer un modelo hidrogeológico local para seleccionar sitios factibles de perforación de pozos de agua de consumo humano o uso agrícola.

La información ayuda a definir la interpretación geohidrológica a escala regional no solo para encontrar mantos acuíferos potencialmente aprovechables sino también para estudiar la estructura, geometría y los mecanismos de recarga y descarga de los sistemas de flujo más importantes, así como la calidad química de sus fuentes.

La geología predominante, está constituida por rocas volcánicas con su secuencia alternante de tobas, brechas y piroclastos, de naturaleza basalto andesítico, así como por depósitos lacustres y aluviales, de granulometría y compacidad variables, que comprenden del Paleógeno-Neógeno al Reciente.

Las resistividades asociadas con rocas acuíferas varían de unas cuantas decenas a pocos cientos de ohm-m, sin llegar a rebasar los miles.

Cualitativamente se espera mayor aportación de agua y de mejor calidad en rocas volcánicas fracturadas que en depósitos lacustres o aluviones.

Las partes más inconvenientes o desfavorables hidrogeológicamente se detectan en la cabecera de la cuenca, con fuertes elevaciones topográficas y, en el mejor de los casos, con caudales inciertos y niveles piezométricos muy profundos.

Los dictámenes recomiendan perforar pozos de 150 a 350 m de profundidad. Pozos ubicados en las partes elevadas alcanzan grandes profundidades en comparación con los de las partes bajas, aunque allá se han manifestado gastos de 15 a 20 lps.

La mayor parte de estos dictámenes culmina con la construcción de las obras subterráneas, así que también fue aportada información de cortes litológicos, registros eléctricos, pruebas de productividad y análisis de calidad del agua.

En el lugar que le corresponde de acuerdo con el índice general del estudio se consigna esta información, sin lugar a dudas de sumo interés práctico.

ACTUALIZACION HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: MARAVATIO-CONTEPEC-EPITACIO HUERTA, ZACAPU, MORELIA-QUERÉNDARO Y PASTOR ORTIZ, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. 2007. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA, PARA LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. El objetivo general es conocer las condiciones actuales de explotación del agua subterránea y funcionamiento hidrogeológico del acuífero Zacapu (1606), con el objeto de que sirva de herramienta, para proponer las políticas de explotación adecuadas y estar en condiciones de realizar un mejor aprovechamiento del recurso subterráneo. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El acuífero pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico (INEGI, 2007), abarca parte de las Sub-provincias Neovolcánica Tarasca y Sierras y Bajíos Michoacanos.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por una gran masa de rocas volcánicas de diversa naturaleza, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos, iniciados desde el Paleógeno-Neógeno hasta el presente, definiendo las sierras circundantes del acuífero.

Otro rasgo esencial de la provincia corresponde a las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como el de Pátzcuaro, Cuitzeo y Totolcingo, o por depósitos de lagos antiguos. Dentro de esta provincia se localiza casi toda la cuenca del río Lerma, quedando fuera de ella los afluentes provenientes de la Mesa del Centro.

3.2. Clima

El clima se clasifica como templado subhúmedo, la temperatura media anual es de 16.12° C, mientras que la precipitación media anual es de 766.32 mm, con un período principal de lluvias de junio a septiembre. Los vientos dominantes poseen dirección noroeste, y en promedio se presentan 13 días con heladas al año.

Con base en información climatológica disponible en el Servicio Meteorológico Nacional, de la Subdirección General Técnica, de la Comisión Nacional del Agua, se seleccionan por su ubicación y período de registro, las estaciones Copándaro de Galeana (16023), Huaniqueo (16050), Puente San Isidro (16100), Santa Fe (16118), Tiríndaro (16188), Villa Jiménez (16225), Caurio de Guadalupe (16248) y Teremendo (16254), enclavadas en el estado de Michoacán.

El análisis de los promedios mensual y anual de precipitación y temperatura comprende el período 1979-2004, mientras el de la evaporación abarca de 1979 a 2002. El promedio anual de precipitación es 766.32 mm, con 574.44 de valor mínimo registrado en el año 1996 y 957.54 como máximo acaecido en 1992. La temporada de lluvias ocurre entre los meses de junio y septiembre, con tormentas ocasionales significativas en octubre; en julio cae la mayor precipitación con 176.72 mm y marzo es el de menor, con 4.66 mm.

La temperatura anual promedio es 16.12° C, se midió 14. 68° C en 1999 y 17. 92° C en 1991. Se determina que mayo es relativamente el más cálido con 19.16° C en promedio, mientras enero registra 12.47° C. La evaporación potencial promedio es de 1736.06 mm/año, 1551.97 mm es su límite inferior y se obtuvo en 1992, 1997.75 mm corresponde a su máximo registrado en 1998. Abril tiene la evaporación más grande con 204.67 mm, en cambio diciembre registra 73.91 mm.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica dentro de la Región hidrológica No. 12, Lerma-Chapala-Santiago, un escurrimiento relevante es el río La Patera, el cual, confluye poco antes de llegar a Villa Jiménez, por la margen derecha al río Angulo, de los afluentes más importantes del río Lerma.

El río La Patera tiene dirección noreste, es el dren principal de la ciénaga de Zacapu; por Villa Jiménez se asienta el Distrito de Riego No. 22 “Zacapu”. El Angulo nace de la descarga de manantiales, los más caudalosos son los que forman la Lagunas Zacapu y Tarajero. El límite del acuífero coincide aproximadamente con el parteaguas hidrográfico de las montañas circundantes del acuífero, es una demarcación virtual.

De datos hidrométricos mensuales de 1979 y 1980, de la estación Villa Jiménez, se determinan escurrimientos sensiblemente uniformes durante el estiaje y las lluvias, deduciéndose buena permeabilidad y consecuentemente alta capacidad de infiltración de los materiales superficiales del acuífero.

El escurrimiento que aporta la Laguna Zacapu al río Angulo se estima en 1.65 m³/s durante el estiaje, el cual funciona como colector general de la cuenca y se une por la margen izquierda al Lerma, después de unos 60 km de recorrido por donde recibe las descargas de una extensa red de drenes agrícolas ubicados en la Ciénaga y en los valles de Panindícuaro y Angamacutiro, el río Angulo es aprovechado por el embalse de la Presa Melchor Ocampo.

3.4. Geomorfología

Se distinguen dos rasgos geomorfológicos representativos, cerril y valle; el primero y más destacado, se origina por abundantes efusiones volcánicas basálticas que surgieron a través de estructuras fisurales y se encuentran a las mayores altitudes en la porción sur-suroeste del acuífero, representadas por los cerros.

El Tecolote con 3360 msnm ubicado al oriente de Zacapu y El Tule, al noroeste, con 3100 msnm, así como por El Angaruen, Partidas, La Curinda, La Curindita, Mesteño, El Pílon, El Capen y Caratacua con 3100 msnm de altura promedio, localizados al sureste, sur y suroeste de la comunidad La Mojonera.

Otros tienen elevaciones de 2300 a 2800 msnm, están circundando los valles, corresponden a volcanes compuestos acompañados por conos cineríticos en sus laderas.

Al noreste de Zacapu con amplia distribución espacial se observan efusiones volcánicas de malpaís y abundantes depresiones o cavidades de forma irregular y variadas dimensiones; igualmente, por la comunidad Comanja se manifiestan estos mismos rasgos geomorfológicos, pero de menor extensión.

Dos depresiones originadas por calderas de unos 500 m de diámetro contienen lagos pequeños, se conocen como Hoya Alberca, uno se ubica en la comunidad La Estación y otro al oriente de la de La Alberca o Lienzo Charro. Las rocas de estas estructuras, es de origen basáltico con algunos componentes andesíticos.

El segundo rasgo no menos importante concierne al relieve plano del valle o Ciénaga de Zacapu con 2000 msnm de altura promedio y muy baja pendiente que desciende en dirección norte, hacia Villa Jiménez; en el límite sur del acuífero existen valles intermontanos de menor amplitud ubicados entre 2400 y 2700 msnm de altitud.

Los valles se rellenaron por materiales de granulometría, espesor y grado de compacidad variados.

El drenaje superficial es radial a subdendrítico, influenciado por las propias estructuras rocosas, con cauces angostos poco profundos, de régimen intermitente torrencial, que desaparecen al aproximarse al valle, lo cual es indicativo de la buena permeabilidad prevaleciente en los materiales granulares del mismo.

4. GEOLOGÍA

Las características geológicas del acuífero son las mismas que las del Eje Neovolcánico, principalmente de carácter explosivo, cuyas emisiones cubrieron el basamento pre-existente y están representadas por rocas de composición andesítica.

Durante el Paleógeno-Neógeno y Cuaternario la actividad volcánica cambio su composición andesítica a basáltica con alternancia de derrames, brechas y piroclásticos finos a medios, que originaron conos cineríticos.

De acuerdo con información litológica, afloran rocas ígneas extrusivas del Eje Neovolcánico, del Neógeno al Cuaternario, la información es muy general, a escala regional (figura 2).

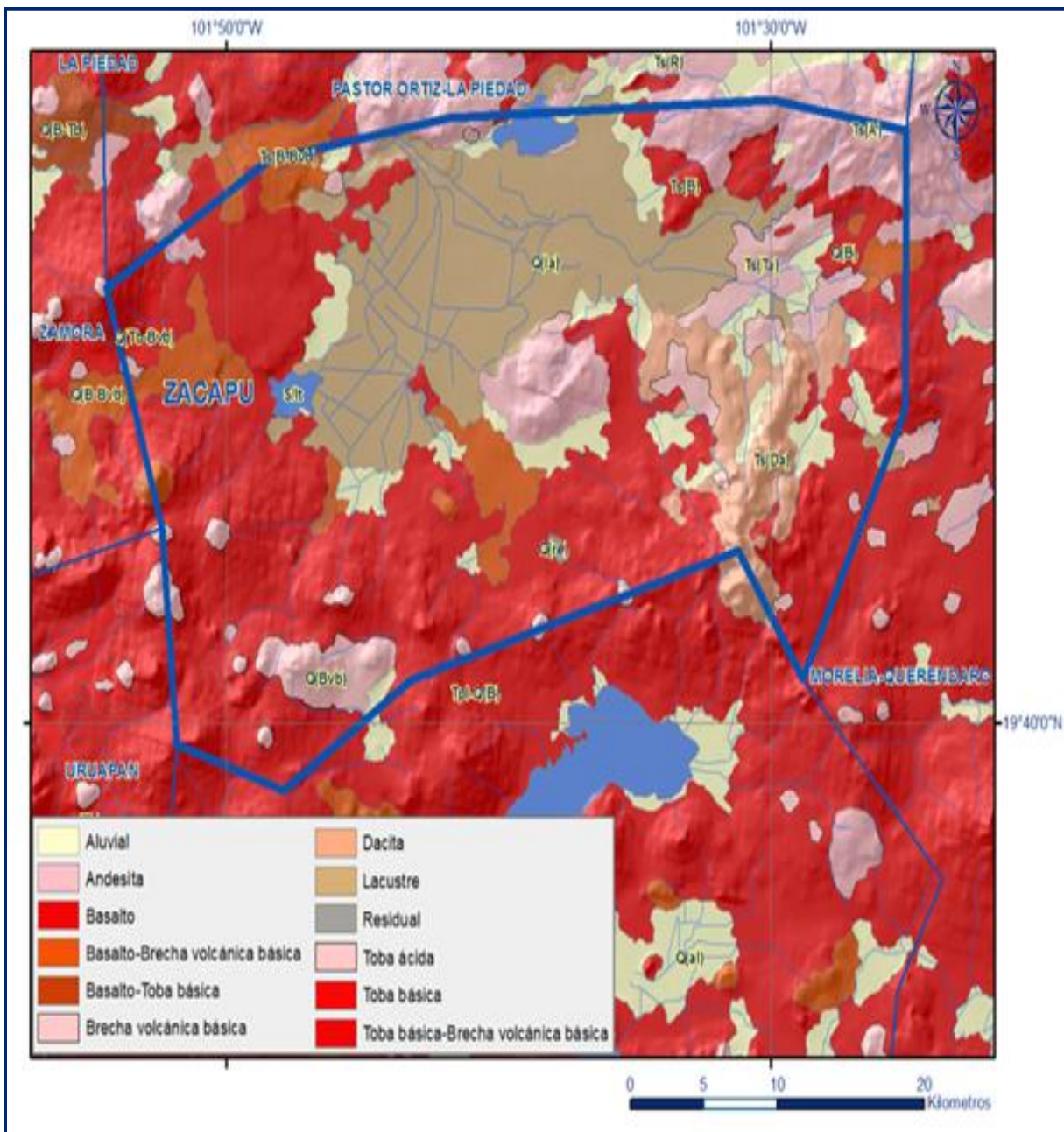


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

A continuación, se describen las distintas unidades litológicas en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente:

Rocas ígneas Paleógeno-Neógenas

Las rocas más antiguas expuestas corresponden a tobas ácidas Ts (Ta) que están cubiertas por dacitas Ts (Da), sobre las que descansan brechas basálticas Ts (Bvb) y una alternancia de basaltos y brechas Ts(B-Bvb), que a su vez taparon los derrames andesíticos Ts(A) y de basalto Ts(B), por último, las manifestaciones basálticas del plioceno TplQ(B) cubrieron las unidades anteriores.

Rocas ígneas Cuaternarias

Durante el Cuaternario se cubrió la secuencia Paleógena-Neógena por un vulcanismo esencialmente de composición basáltico, constituido en forma alternante por tobas Q(Tb), piroclásticos, tobas básicas y brechas volcánicas Q(Tb-Bvb) y Q(Bvb), y por derrames Q(B) y Q(B-Bvb).

Tienen distribución amplia, forman estructuras cónicas compuestas y cineríticas.

Sedimentos lacustres Q(la)

Sobre los derrames y piroclásticos basálticos se depositaron sedimentos lacustres de limo y arcilla, de espesor y compacidad variable; se observan en el valle.

Suelos residuales Q(re)

Son producto de la alteración de rocas basálticas, están constituidos por arcilla y arena fina, con empaquetamiento de fragmentos de diverso tamaño, alterados, afloran localmente al sur de la colonia Benito Juárez.

Aluvión Q(al)

Se ubican en las partes bajas, consisten de arena, limo y arcilla, tienen unos cuantos cm a decenas de metros de espesor.

4.2. Geología estructural

El acuífero está inmerso en la tectónica y estructura geológica del Eje Neovolcánico, representada por grandes estratovolcanes, al sur, asentados en lineamientos con orientación noroeste-sureste, y por fosas tectónicas en su porción norte. Los estratovolcanes se originan a través de fracturamiento corticales.

El vulcanismo también se relaciona con la subducción de la Placa de Cocos, modelo de arco magmático intra-cratónico sin deformación compresional, solo afectado por una fase de tensión a causa de la inestabilidad sísmica de la actual margen convergente Pacífica.

Esa fase tensional originó fallas, fisuras y aparatos volcánicos como estratovolcanes y conos cineríticos a través de los cuales surgieron grandes masas de roca calco-alcalina basalto andesita dacítica. Por otro lado, la geotectónica distensiva Plio-cuaternaria, en el norte de Michoacán, es tipo vertical diferencial con fallas corticales escalonadas, dando lugar a la formación de cuencas endorreicas y fosas tectónicas. El acuífero Zacapu pertenece a estas últimas estructuras, con fallas de tipo normal, rumbo noreste-suroeste e inclinaciones no mayores a 55°.

4.3. Geología del subsuelo

La descripción estratigráfica descrita, proporciona una base de lo que se puede encontrar en el subsuelo del área. Se presentan secciones geológicas esquemáticas en las figuras 3 y 4. El basamento litológico está constituido por rocas marinas de origen carbonatado y clástico, Ks, como caliza, lutita y marga, ubicadas a unos 1000 m de profundidad, se originaron en el Cretácico Superior. Sobreyacen discordantemente rocas Paleógenas-Neógenas de composición basáltica Ti(B) de unos 200 m de espesor. En la parte oriental del acuífero se acuña una estructura formada por derrames y piroclastos andesíticos Ti(A).

Igualmente, con geometría irregular descansan de manera discordante depósitos lacustres TI(cg), con abundancia de conglomerados rojos de poco espesor. En forma alternante se infieren los mismos depósitos lacustres con intercalaciones de clásticos medios a finos TI(arc-ars), los cuales afloran al oeste de Huaniqueo, su espesor estimado es 500 m.

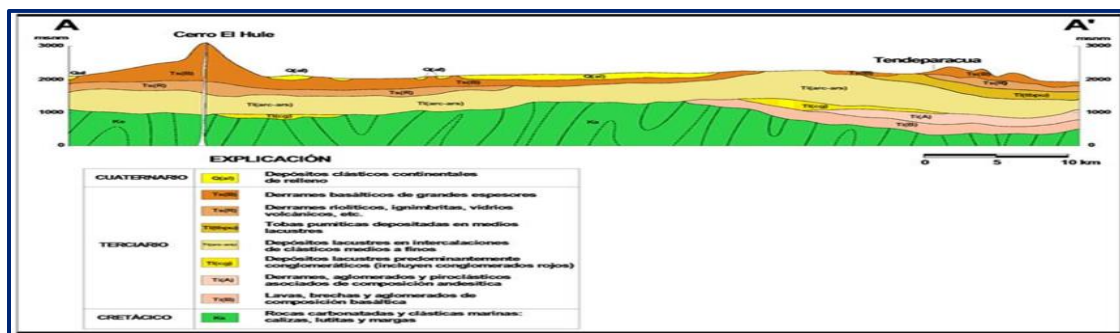


Figura 3. Sección geológica A – A'

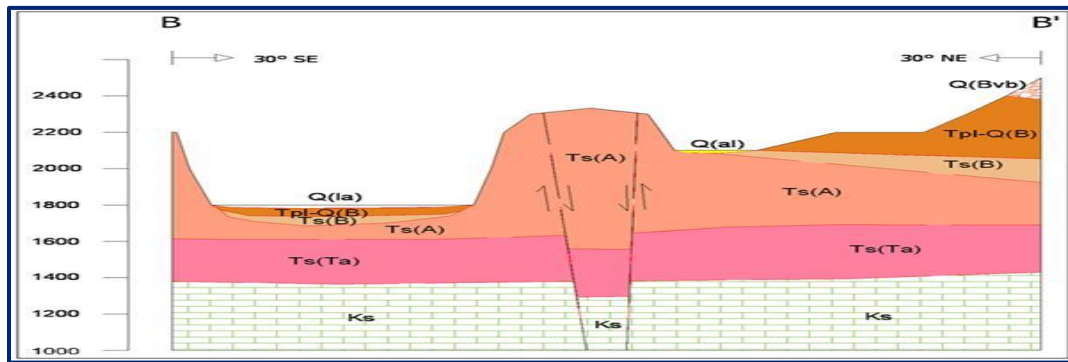


Figura 4. Sección geológica B – B'

Cubren los lacustres un lente de tobas pumíticas TI(tbpu) de igual origen, con unos 200 m de espesor. Les siguen piroclastos Ts(R), derrames, ignimbritas y vidrios volcánicos de composición riolítica, de hasta de 500 m de espesor.

Del Neógeno se tienen derrames y piroclastos basálticos Ts(B) de gran espesor. Finalmente, arriba de la secuencia general referida se encuentran basaltos y sedimentos lacustres del Cuaternario Q (hola), bien expuestos en las zonas bajas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

En función del análisis geológico, geofísico, hidrodinámico y piezométrico se determina que el acuífero es de tipo libre o freático a escala regional, con presencia de semiconfinamiento local. Probablemente los tipos de material encontrados en el subsuelo saturado y permeable se encuentran interconectados hidráulicamente funcionando como una sola unidad hidrogeológica.

Por sus enormes dimensiones y grado de fracturamiento relativamente desarrollado, revisten más importancia hidrológica las rocas de origen volcánico que los materiales lacustres o de relleno.

5.2. Parámetros hidráulicos

Las características hidráulicas se estimaron a partir de pruebas a gasto constante y escalonado, en régimen transitorio, para acuíferos confinados o libres de espesor saturado mucho mayor que los descensos provocados por el bombeo, las pruebas corresponden a pozos representativos del acuífero.

Son ensayos útiles para estimar la conductividad hidráulica horizontal, el coeficiente de transmisividad, las pérdidas de carga de formación y construcción, así como el grado de eficiencia del pozo de bombeo en relación con aspectos de diseño o problemas de obturación y deterioro de la rejilla. Se realizaron con motivo de la actualización del estudio de 2007, cinco pruebas a gasto constante, con duración variable, tendiendo a lo mayor posible, lo que obedeció a la disponibilidad del equipo del pozo.

El coeficiente de transmisividad representa la cantidad de agua que fluye en el subsuelo saturado, es función directa del espesor saturado y la conductividad hidráulica, el rendimiento de pozos mucho depende de este parámetro.

En la porción centro poniente del acuífero, varía entre 2 y 20, con distribución local de 40 a $90 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, de 1.5 a 30×10^{-3} en la parte sur oriental, entre 2 y 15×10^{-3} en la zona norte, y de 2 a $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en el límite noreste. El promedio regional es 6.8×10^{-3} y 35.1×10^{-3} , ó $20.95 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ como media global. A nivel regional el acuífero es de tipo libre con 0.13 de rendimiento específico estimado.

Desde el punto de vista local se detectan acuíferos semi-confinados cuyo coeficiente de almacenamiento se aproxima a 0.0075. En las porciones norte y oriente del acuífero varía entre 1.0 y $5.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, de 5.0 a 20.0×10^{-5} en la zona de riego de la porción central del valle, hacia el sur entre 2.0 y 30.0×10^{-5} , y entre 2.0 y $50.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ en la porción oeste, hacia Zacapu se encuentran las rocas más permeables. Los promedios son 3.64×10^{-4} para las pruebas de aforo y 8.86×10^{-5} para las de bombeo, con $22.63 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ de valor medio general.

5.3. Comportamiento hidráulico

A escala regional, el acuífero es de tipo libre, y localmente es de tipo semiconfinado. Las rocas de origen volcánico, por su amplia distribución y grado de fracturamiento muy desarrollado, son las que presentan mayor importancia hidrológica, por encima de los materiales lacustres o de relleno.

5.4. Piezometría

Se utiliza la información piezométrica obtenida durante el levantamiento del censo de pozos, actividad realizada durante los meses de noviembre y diciembre de 2007, y los niveles estáticos anteriores disponibles de obras piloto que se correlacionaron razonablemente con la numeración actual asignada.

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para 2007 se presenta en la figura 6. Los niveles se encuentran a muy poca profundidad en la mayor parte del acuífero, varía entre 5 y 2 m en el límite norte, entre 3 y 10 en el lado sur, entre 3 y 10 en el lado oriente, y de 3 a 5 m de profundidad al occidente. Como se puede deducir, la evapotranspiración de agua freática es una de las descargas principales del acuífero.

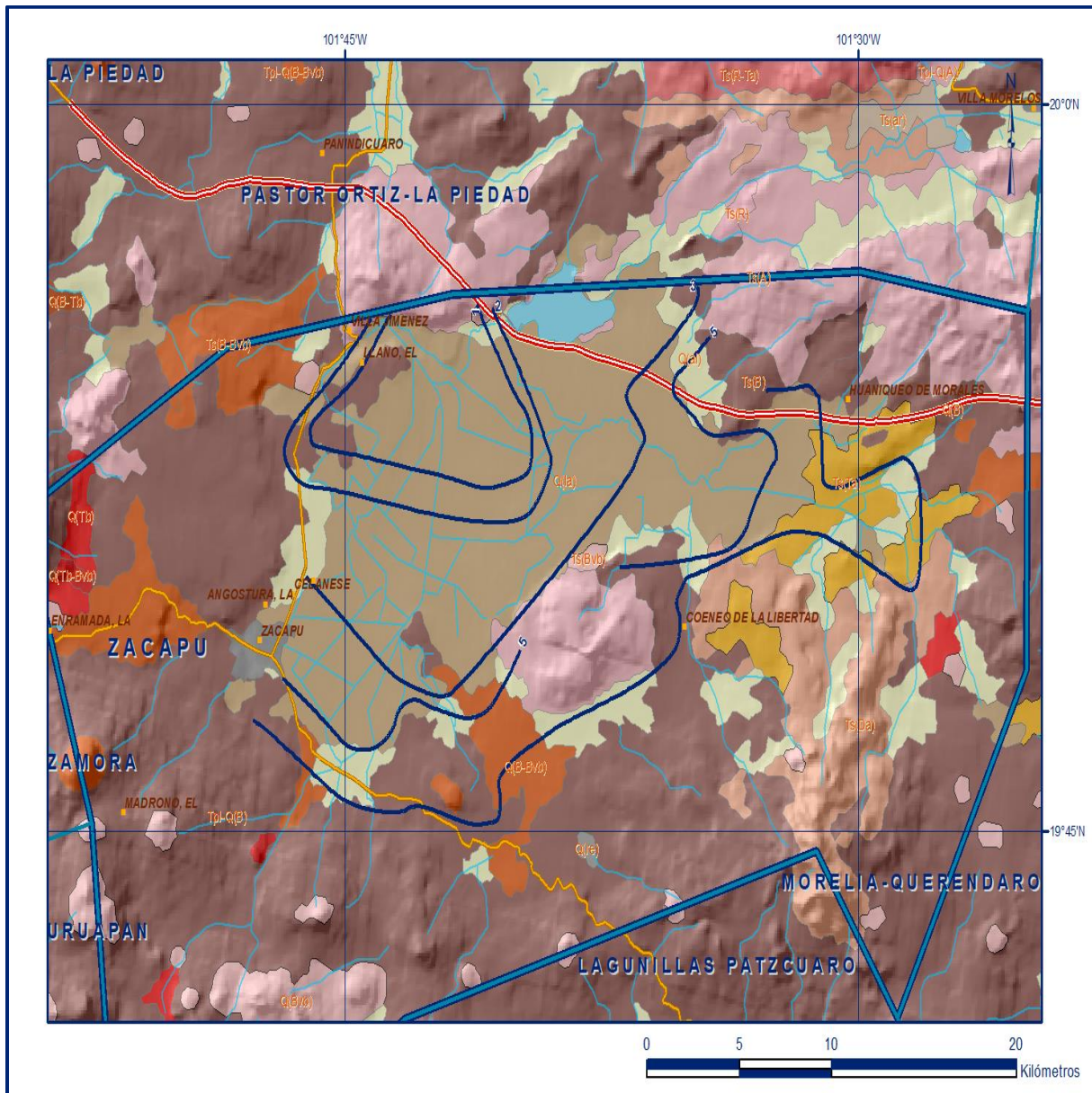


Figura 6. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración del nivel estático (figura 7) muestra que el flujo del agua subterránea es radial concéntrico, en los bordes del acuífero la equipotencial es 2015 y 1988 msnm en la zona central del mismo.

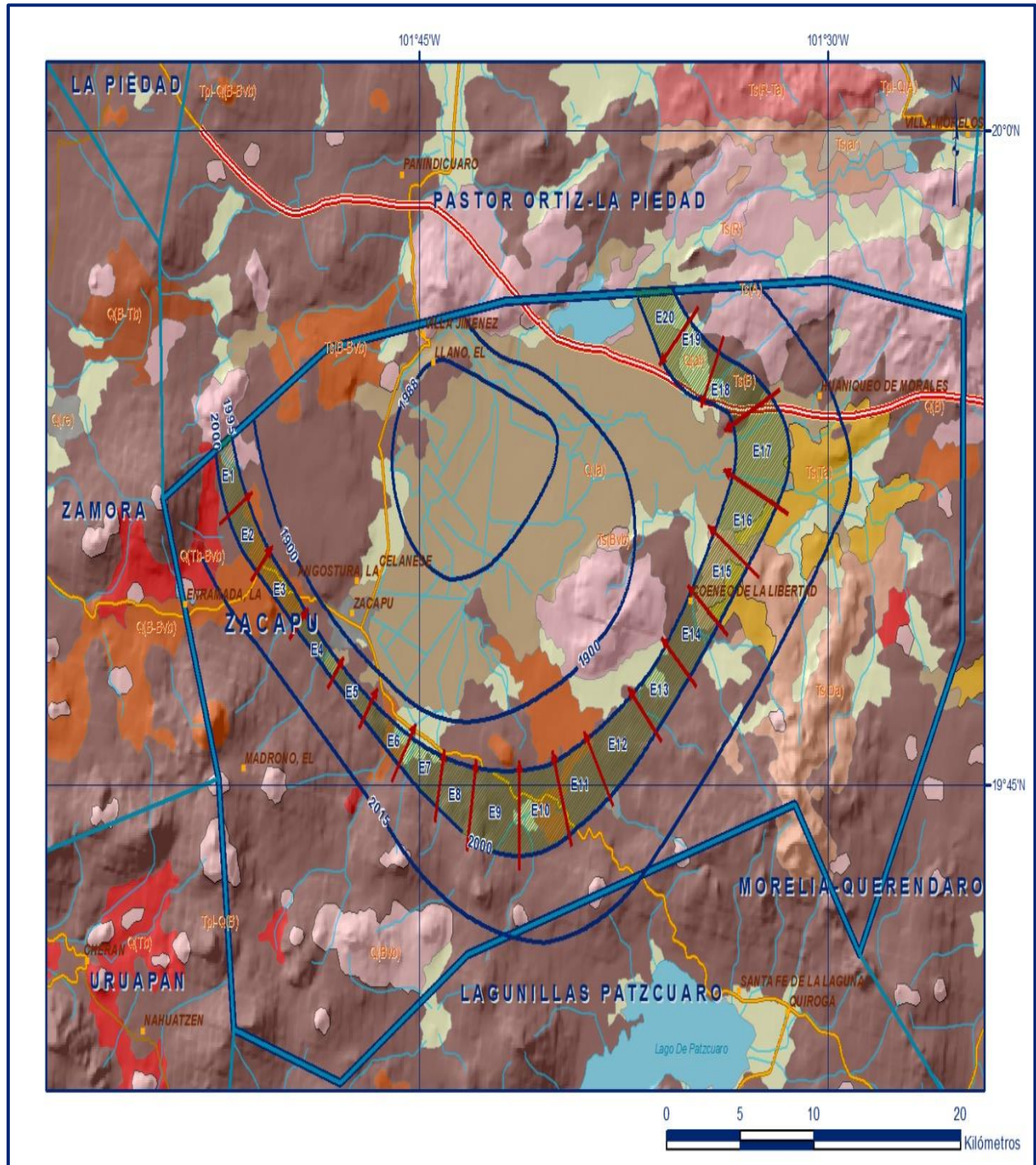


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

Se observa asimismo que no existen salidas subterráneas, sino que el flujo de agua procedente de las porciones montañosas limítrofes va a parar al valle, siendo desalojado a través de manantiales y por evapotranspiración. El esquema piezométrico revela condiciones estables o de equilibrio, y gradientes hidráulicos moderados o relativamente bajos debido a la buena permeabilidad del acuífero.

5.4.3. Evolución de nivel estático

Existen pocos registros de niveles de agua, solo se identifican pozos aislados con datos piezométricos a partir de los cuales se elabora la configuración relativa al lapso 1982 – 2007 (figura 8).

La evolución piezométrica sugiere condiciones estables de la posición del nivel, o recuperaciones entre 0.5 y 5.0 m, entre 0.5 y 4.0 m y del orden de 0.5 m al noreste, sur y zona central del acuífero, respectivamente; en su flanco sur occidental se infiere una posición constante del nivel sin cambio apreciable.

En las partes altas se observa localmente 11.0, 5.35 y 6.28 m de recuperación, y 0.30 m en el valle; el periodo de análisis es 1982-2007.

Los hidrógrafos a su vez manifiestan ascensos de nivel en los pozos 39, 52, 56, 62, 88, 90, 96, 116 y 142; su comportamiento es congruente y consistente con el de la evolución. Los pozos 63 y 132 muestran abatimiento de nivel.

No es posible concluir con suficiente confiabilidad, por los escasos de datos, cual es el comportamiento estacional o periódico entre lapsos de recarga y descarga del acuífero; sin embargo, por el análisis hidrogeológico global, se estima que a largo plazo el esquema hidráulico se mantiene invariable, lo cual quiere decir que prevalece un escenario de equilibrio hidrodinámico. Se deduce una evolución media regional de +0.25 para el lapso 2006 - 2007.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

19

De acuerdo con el diagrama de Piper, el agua es bicarbonatada cálcica, que los solutos tienen origen volcánico y que esto es congruente con el marco físico del acuífero.

Los análisis sugieren en términos generales que el agua subterránea es apta para fines potables. Los contenidos de hierro y cadmio están por debajo de los límites permisibles, de acuerdo a la Norma de Calidad del Agua NOM-127-SSA1-1994.

La relación de adsorción de Na del agua subterránea, resultó tipo S1, baja en el mismo, por lo que puede usarse en la mayor parte de suelos con escasa posibilidad de alcanzar elevada concentración de este elemento. Se deduce del diagrama de Wilcox, que relaciona la salinidad y el índice RAS (Relación de adsorción de Sodio), la aceptación del agua para fines agrícolas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

Como parte de las actividades del estudio de 2007, se censaron 155 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 67.74% son pozos, 17.42% manantiales y el 14.84% norias. El 58.60% de los aprovechamientos son de uso público urbano o agua potable, 24.20% de uso agrícola, 4.46% para fines domésticos, 7.01% se destinan a actividades diversas y el 5.73% se encuentran inactivos. En cuanto a su equipamiento, el 85.16% de los aprovechamientos cuentan con motor eléctrico, 17.16% tiene motor a gasolina, 0.65% es de molino de viento y 13.55% no tienen.

El 48.39% de los equipos son sumergibles, 27.10% de turbina, 7.10% verticales, 1.94% motobombas, 1.94% caseras y 13.55% no tienen. La profundidad de los pozos fluctúa entre 16 y 320 m, predomina la de 21 a 150 m de profundidad.

Los diámetros de descarga van de 1/2 a 12", aunque los que más abundan son de 3, 4 y 8". Los caudales de extracción fluctúan entre 0.5 y 280.0 lps, predominando entre 5.5 y 20.0 lps. Los gastos de cientos de lps corresponden a descarga de manantiales, estos participan de manera muy importante en las salidas totales de agua del acuífero.

Para determinar los volúmenes de extracción, se emplearon los métodos gasto-tiempo de operación, lámina media de riego aplicada, dotación doméstica y potable y aforo aproximado de manantiales. El bombeo a través de pozos y norias se estima en 23.0 hm³/año.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 como sigue:

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

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 de un acuífero:

$$\text{Recarga total (R)} - \text{Descarga total (Dt)} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

ΔV_s es el cambio de almacenamiento definido como $\Delta V_s = AB * hN * S$, AB es el área de balance geohidrológico, hN es la evolución de nivel estático promedio relativa al intervalo y área considerados, positivo cuando sufre recuperación y negativa en caso contrario, S es el coeficiente de almacenamiento.

7.1. Entradas

Las entradas o recarga total (R) está dada por flujo horizontal (Eh), infiltración efectiva por lluvia (Rv), pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable (Rp) y por retornos de riego en la superficie agrícola (Rrr).

La recarga (R) del acuífero es la diferencia algebraica entre su descarga total y cambio de almacenamiento subterráneo relativo a un determinado intervalo de tiempo, generalmente un año para incluir periodos de estiaje y lluvia.

7.1.1. Recarga vertical

La principal fuente de recarga es la precipitación a través del mecanismo de la infiltración. Sin embargo, es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

En términos explícitos, la ecuación de balance geohidrológico aplicable al acuífero Zacapu queda de la siguiente forma.

$$(Eh + Rv + Ri) - (B + Sh + ETR + Qb + Sm) = \pm \Delta Vs$$

$$Rv = (B + Sh + ETR + Qb + Sm) - (Eh + Ri) \pm \Delta Vs$$

$$R = Rv + Eh + Ri$$

La recarga total (R), es la recarga natural o vertical (Rv), Eh y Sh son las entradas y salidas subterráneas, B es el bombeo, Ri, ΔVs y ETR, la recarga inducida abarca tanto las pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable, como los retornos de riego en la superficie agrícola, el cambio de almacenamiento subterráneo y la evapotranspiración real de la superficie freática, respectivamente. Qb es la descarga por flujo base de corrientes perennes y Sm la salida a través de manantiales.

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos.

Para estimar las entradas por flujo lateral se aplica las ecuaciones de continuidad y Darcy, simplificando y agrupando términos tiene la representación final.

$$Q = T * B * i$$

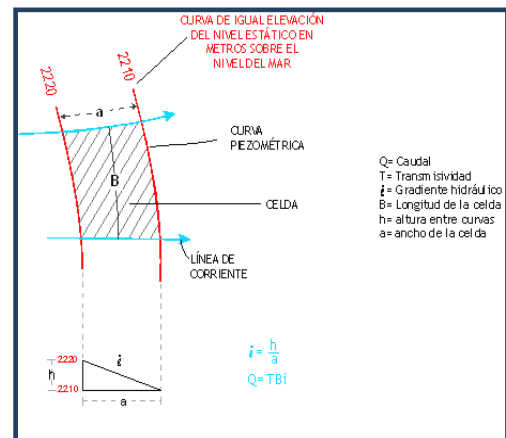
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

T = Transmisividad (m^2/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La figura 7 muestra los canales de flujo para noviembre de 2007, el caudal total es la suma de los gastos individuales, la tabla 2 presenta los parámetros, el gasto y volumen anual de cada canal. La entrada total por flujo horizontal es de $\approx 81.2 \text{ hm}^3/\text{año}$.

La transmisividad se estimó a partir de la geología y de pruebas de aforo y bombeo, representa la cantidad de agua que fluye en el subsuelo saturado, es el producto de la conductividad hidráulica horizontal y el espesor efectivo. Se definieron 20 canales de flujo cuyas características geométricas e hidráulicas se presentan en la citada tabla.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo horizontales

Canal	Longitud [m]	Ancho [m]	delta h m	Gradiente [m/m]	T [m ² /s]	caudal (m ³ /s)	V (hm ³ /año)
1	3000	1500	5	0.00333333	0.022	0.22	6.9
2	3000	1500	5	0.00333333	0.022	0.22	6.9
3	3000	1300	5	0.0038462	0.022	0.25	8.0
4	3000	1300	5	0.0038462	0.022	0.25	8.0
5	3000	1400	5	0.0035714	0.022	0.24	7.4
6	3000	1500	5	0.00333333	0.022	0.22	6.9
7	3000	1600	5	0.003125	0.013	0.12	3.8
8	3000	2500	5	0.002	0.013	0.08	2.5
9	3000	3700	5	0.0013514	0.013	0.05	1.7
10	3000	3700	5	0.0013514	0.013	0.05	1.7
11	3000	3000	5	0.0016667	0.013	0.07	2.0
12	3000	3100	5	0.0016129	0.013	0.06	2.0
13	3000	2300	5	0.0021739	0.029	0.19	6.0
14	3000	2300	5	0.0021739	0.029	0.19	6.0
15	3000	2700	5	0.0018519	0.029	0.16	5.1
16	3000	3000	5	0.0016667	0.029	0.15	4.6
17	3000	4000	5	0.00125	0.003	0.01	0.4
18	3000	2900	5	0.0017241	0.003	0.02	0.5
19	3000	2900	5	0.0017241	0.003	0.02	0.5
20	1500	2100	5	0.002381	0.003	0.01	0.3
							81.2

Como resultado se obtuvo un valor de **81.2 hm³/año** que representa las entradas por flujo horizontal a la zona de balance de aguas subterráneas.

7.1.3. Recarga inducida

Aun en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego. Para este caso, se aplican a la agricultura de riego aproximadamente 5.6 hm³/año de agua subterránea de pozos y manantiales; se supone que 15% de este volumen regresa al acuífero como recarga inducida natural. La recarga por retornos de riego equivale a $R_{rr} = 0.8 \text{ hm}^3/\text{año}$. El aprovechamiento del acuífero y de los manantiales para fines municipales o de uso público urbano y domestico es estimado en 47.52 hm³/año; de este volumen, se asume que 30% retorna al acuífero por fugas en las líneas de conducción y en las redes de distribución de los abastecimientos potables.

Lo que para los sistemas de aprovisionamiento representan pérdidas de agua, para el acuífero significan lo contrario; se considera una recarga inducida natural. Por lo tanto, $R_p \approx 14.3 \text{ hm}^3/\text{año}$. El total de la Recarga inducida es de **$15.1 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2. Salidas

7.2.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración representa la cantidad de agua liberada del suelo a la atmósfera debido a la evaporación y transpiración de las plantas; es una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración, una considera el contenido de humedad en el suelo (evaporación potencial) y otra se refiere al uso consuntivo de las plantas (evapotranspiración real).

Hipotéticamente, a 10 m de profundidad al nivel freático, la evapotranspiración es nula, por el contrario, si el nivel se encuentra en la superficie del terreno es máxima.

Para el cálculo de la lámina de evapotranspiración real se utiliza la ecuación de Turc que toma en cuenta los valores medios anuales de temperatura y precipitación, de 15.6°C y 748.2 mm .

Ecuación de Turc

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

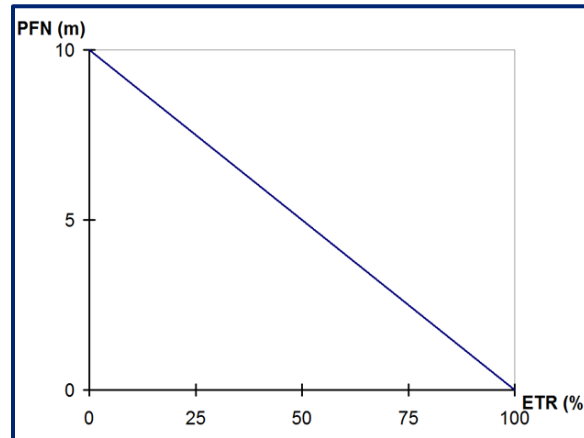
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.12		
P(mm) =	766.32	P ² =	587246.3424
L =	912.44	L ² =	832551.583
AREA, Km ²	538.07		
ETR, mm	604.82	78.92%	

L es un parámetro adimensional definido por un polinomio cúbico, función de la temperatura anual media.

El 78.92% de la lluvia anual regresa a la atmósfera por el mecanismo de la evapotranspiración real, estimada en 604.82 mm .

La evapotranspiración corresponde a pérdida de agua freática somera, es una salida en la ecuación de balance geohidrológico, tiene influencia hasta 10 m de profundidad al nivel freático. Se asume que la ETR y PNF siguen la relación lineal:



A menor profundidad al nivel freático mayor será el % de ETR. Se adopta un promedio entre curvas de igual profundidad al nivel freático a partir del cual se determina el % de ETR del gráfico de arriba, se estima el área entre curvas y se obtiene el volumen correspondiente por medio del producto de ésta y la lámina y % de ETR.

La tabla 3 muestra su procedimiento numérico y el resultado global de ETR. ETR resulta de $\approx 130.2 \text{ hm}^3\text{anuales}$.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración.

Intervalo curvas (m)	$\overline{NF}$, m	% DE AREA DE INFLUENCIA	AREA NETA, km^2	% ETR	ETR, m	ETR, $\text{Mm}^3/\text{año}$
0 - 1	0.75	10.00	53.81	60.00	0.605	19.53
1 - 2	0.75	15.00	80.71	60.00	0.605	29.29
2 - 3	2.50	20.00	107.61	50.00	0.605	32.54
3 - 5	4.00	20.00	107.61	40.00	0.605	26.03
5 - 10	7.50	35.00	188.32	20.00	0.605	22.78
S		100.00	538.07			130.174
$\bar{X}_p$	3.10			46.00	0.605	

7.2.2. Bombeo

La salida del acuífero por el bombeo de pozos y norias es del orden de **23.0 $\text{hm}^3\text{año}$** .

7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal

La red de flujo de la Figura 10 muestra la inexistencia de salidas subterráneas hacia acuíferos contiguos, por lo tanto, no existe flujo subterráneo de salida.

7.2.4. Flujo base

Son seis corrientes superficiales que tienen gasto base, la tabla 4 muestra el nombre y la longitud media de cada una, se admiten características hidrogeológicas similares para todas.

Tabla 4. Corrientes perennes.

Corriente	Desarrollo, km
A. Grande	6
La Patera	11
La Cal	6
La Haciendita	4
La Manza	4
Los Cinco Sauces	3
Total	34

El flujo base es una salida de agua subterránea convertida en escurrimiento superficial, es máximo al inicio de estiaje, desciende o desaparece durante lluvias. Eventualmente esos arroyos pueden convertirse en corrientes influentes si la posición relativa de los tirantes del río llega a ascender por arriba de los niveles freáticos del acuífero marginal, lo que suele ocurrir en época de lluvias intensas.

La magnitud y funcionamiento del gasto base aportan información valiosa sobre las características hidrogeológicas de la cuenca, en particular sobre la capacidad de los acuíferos marginales.

Se supone que las corrientes perennes atraviesan el espesor de los acuíferos freáticos someros, que 50% de su caudal proviene de los excedentes de riego con agua superficial y que la diferencia corresponde al gasto base efectivo del acuífero.

En realidad, las curvas de recesión dependen del grado de penetración de la corriente en el acuífero.

La conductividad hidráulica promedio aproximada es $5.0 \cdot 10^{-4}$ m/s, valor coherente con la litología de los materiales y con las estimaciones derivadas de los aforos y pruebas de bombeo, se asocia con arenas limpias uniformes de tamaño medio y grueso, o rocas volcánicas con fracturamiento avanzado.

No se dispusieron de datos hidrométricos directos a partir de los cuales se hace el análisis de hidrogramas, separando el escurrimiento directo del flujo base con mayor grado de exactitud. Estudios de zonas similares arrojan un 30% de flujo base del total de una corriente, lo que manifiesta la importancia geohidrológica de la cuenca. La capacidad de almacenamiento del acuífero marginal influye sobre el régimen de las avenidas y el gasto base durante los periodos de lluvia y estiaje, respectivamente. La curva de recesión tiene la forma exponencial $Q_b = Q_0 C^t$

Q_b es el gasto base en un tiempo t del estiaje, Q_0 es el gasto base inicial para $t=0$; C es un coeficiente que depende de las características hidrogeológicas de la cuenca, se determina de la pendiente de la recta de recesión del hidrograma; para fines prácticos se aproxima a 0.93, es el parámetro de la ecuación con mayor sensibilidad y el que más influye.

Q_0 se considera $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ como gasto inicial del estiaje, se desconoce la exactitud de este dato, sin embargo, se asume un caudal conservador tomando en cuenta la notable permeabilidad de los escurrimientos, la variable que más influencia tiene sobre Q_b es el coeficiente C . El promedio del estiaje es 240 días, de la segunda semana de octubre noviembre a la segunda de junio; se consideran 120 días para estimar el gasto medio. Sustituyendo y operando términos tabla 5. El flujo base aproximadamente es de **$3.0 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

Tabla 5. Cálculo de flujo base.

$$Q_b = Q_0 C^t$$

$Q_0, \text{ m}^3/(\text{s-m}) =$	0.025
$C =$	0.93
$t_{\text{et}}, \text{ días} =$	120.00
$Q_b, \text{ m}^3/(\text{s-m}) =$	2.80E-06
$Q_b, \text{ m}^3/\text{s} =$	9.53E-02
$\nabla, \text{ Mm}^3/\text{año} =$	3.00

Q_b varía en proporción directa con Q_0 , pero se incrementa en razón exponencial con el coeficiente C ; por ejemplo, si C aumenta 3% Q_b se incrementa casi 35 veces

7.2.5. Salida por manantiales

La salida a través de manantiales es del orden de **31.3 hm³/año**.

7.3. Cambio de almacenamiento

Con base en la evolución piezométrica relativa al lapso 1982 - 2007, suponiendo una variación lineal de niveles y en el comportamiento de los gráficos de los hidrógrafos de pozos, se deduce que la carga piezométrica promedio anual es +0.252 m y que el cambio de almacenamiento resulta de $\approx 2.0 \text{ hm}^3$ entre 2006 y 2007. La tabla 6 muestra el procedimiento y los resultados numéricos.

Tabla 6. Cambio de almacenamiento subterráneo.

EVOLUCIÓN 1982 - 2007 $\Delta t \approx 25 \text{ años}$

Evolución m	% de Área de influencia	Area parcial, km ²	Evolución promedio pesado m	S	$\Delta V S$ Mm ³ /año
0.00 A + 0.50	35.00	188.32	+ 0.200	0.10	3.766
+0.50 A + 4.00	25.00	134.52	+ 1.000	0.10	13.452
+0.50 A + 5.00	20.00	107.61	+ 1.100	0.10	11.838
+ 4.00	10.00	53.81	+ 2.000	0.10	10.761
+0.50 A + 5.00	10.00	53.81	+ 2.000	0.10	10.761
sumas	100.00	538.07			50.579
		promedio	+0.252	0.10	2.023

Por los resultados alcanzados hasta ahora se deduce que el acuífero se encuentra en equilibrio geohidrológico, con sus entradas y salidas numéricamente equivalentes, así que en teoría para ciclos completos de recarga y descarga promedios la evolución tiende a cero; no obstante, condiciones hidrodinámicas particulares inter-estacionales podrían alterar en un sentido u otro ese equilibrio.

Solución a la ecuación de balance

Regresando a las ecuaciones anteriores de balance geohidrológico.

$$\begin{aligned}
 (E_h + R_v + R_i) - (B + S_h + ETR + Q_b + S_m) &= \pm \Delta V_s \\
 R_v &= (B + S_h + ETR + Q_b + S_m) - (E_h + R_i) \pm \Delta V_s \\
 R &= R_v + E_h + R_i
 \end{aligned}$$

Sustituyendo y operando términos:

$$R_v = (23.0 + 0.0 + 130.2 + 3.0 + 31.3) - (81.2 + 15.1) + 2.0$$

$$R_v = 187.5 - 96.3 + 2.0$$

$$R_v = 93.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

De esta manera, la recarga total media anual es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 93.2 + 81.2 + 15.1$$

$$R = 189.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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 anual (R)

La recarga total anual R, es la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. La recarga total es la suma de la recarga natural, las entradas horizontales y la recarga inducida. **R = 189.5 hm³/año.**

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de manantiales y caudal base de ríos que están comprometidos como agua superficial pero que son alimentados por aguas subterráneas, y, en su caso, las descargas que se deben conservar para no afectar a acuíferos adyacentes, para

sostener el gasto ecológico y para prevenir la migración de agua de mala calidad hacia las fuentes del subsuelo que están siendo aprovechadas. Para este caso, su valor es de **DNC = 125.4 hm³/año**, que corresponde al 30% de la evapotranspiración para no afectar adversamente el entorno natural.

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **37,279,524 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 de aguas subterráneas (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas está representada por el volumen medio al año 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 los ecosistemas.

De acuerdo con lo anterior la DAS se obtiene como la diferencia entre el volumen de recarga total y la descarga natural comprometida y el concesionado e inscrito en el REPDa.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 189.5 - 125.4 - 37.279524 \\ \text{DMA} &= 26.820476 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **26,820,476 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del agua. 1975. Estudio de la Cuenca Lacustre Terciaria del Altiplano Mexicano.

Comisión Nacional del Agua. 1981. Estudio Geohidrológico de los valles de Zacapu y Pátzcuaro, estado de Michoacán.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz-La Piedad, en el estado de Michoacán, elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.