



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNILLAS-PÁTZCUARO (1604),
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	5
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1 Provincia fisiográfica	7
3.2 Clima	8
3.3 Hidrografía.....	9
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía.....	10
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo.....	12
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Parámetros hidráulicos	13
5.3 Piezometría.....	14
5.4 Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	14
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático	18
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1 Entradas.....	22
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.2 Salidas	24
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	25
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.2.3 Descarga por manantiales (Dm)	26
7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	26
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	28
8. DISPONIBILIDAD	29
8.1 Recarga total media anual (R).....	29
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (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-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 Lagunillas-Pátzcuaro, definido con la clave 1604 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-norte del Estado de Michoacán, cubriendo una superficie de 1,149 km², entre las coordenadas 19° 26' y 19° 45' de latitud norte; y 101° 53', 101° 24' de longitud oeste. Colinda al norte con el acuífero Zacapu, al sur con Nueva Italia, al este con Morelia-Queréndaro y al oeste con Uruapan; todos pertenecientes al estado de Michoacán (figura 1).

Geopolíticamente el acuífero comprende parcial o totalmente los municipios Erongarícuaro, Pátzcuaro, Tingambato, Tzintzuntzán, Huiramba, Quiroga, Lagunillas y Nahuatzén, así como porciones muy pequeñas de los municipios Salvador Escalante y Coeneo.

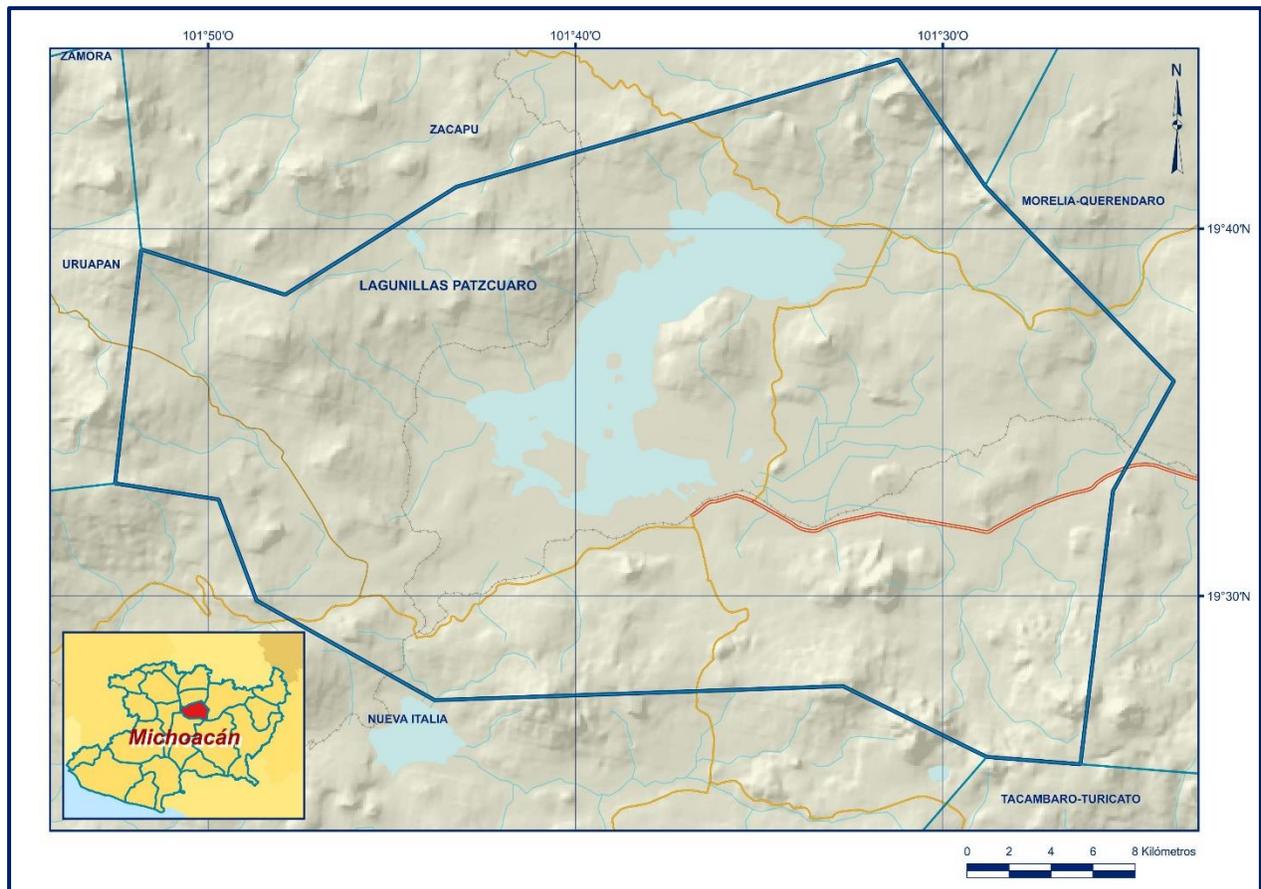


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1604 LAGUNILLAS PATZCUARO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	101	47	54.4	19	38	12.0
2	101	43	14.2	19	41	8.3
3	101	31	13.3	19	44	35.9
4	101	28	51.1	19	41	9.6
5	101	23	42.7	19	35	50.9
6	101	25	22.3	19	32	51.6
7	101	26	15.4	19	25	25.4
8	101	28	48.4	19	25	37.4
9	101	32	43.1	19	27	32.9
10	101	43	50.0	19	27	10.0
11	101	48	41.0	19	29	52.7
12	101	49	42.9	19	32	37.7
13	101	52	32.0	19	33	4.0
14	101	51	49.2	19	39	26.0
1	101	47	54.4	19	38	12.0

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Lagunillas-Pátzcuaro pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma-Santiago-Pacífico” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Michoacán.

Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda; uno que rige en su porción sur: *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 27 de junio de 1975.

El otro decreto de veda rige en la porción norte: *“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 (DOF) el 20 de octubre de 1987. Ambos decretos son de tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El usuario principal del agua subterránea es el sector agrícola. En su superficie no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo varios estudios geohidrológicos de evaluación; algunos lo abarcan parcialmente, pero han tenido una cobertura regional, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES DE ZACAPU Y PÁTZCUARO, ESTADO DE MICHOACÁN. El estudio incluye censo, piezometría, nivelación de brocales, hidrometría de las extracciones, ejecución de pruebas de bombeo y muestreo de agua para análisis fisicoquímicos.

Concluye que la extracción de agua subterránea era del orden de los 15.6 hm³ anuales, en la cual se incluye la descarga de 14.0 hm³ procedentes de manantiales. El agua presentaba excelente calidad química.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, 2000. ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO. En este estudio se define el modelo conceptual del acuífero, identificando sus diferentes unidades hidrogeológicas como son el acuitardo intergranular conformado por sedimentos arcillosos de origen lacustre del Cuaternario; el acuífero mixto de productividad alta conformado por aluvión, basaltos, conos volcánicos y tobas del Cuaternario, basaltos y andesitas del Neógeno (Plio-Pleistoceno) y por último el acuífero mixto de baja productividad conformado por rocas andesíticas, basaltos, dacitas, brecha volcánica y tobas del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno-Mioceno).

Actualiza el censo en 296 de aprovechamientos, la mayor parte de ellos norias de bajo rendimiento que se destinan al uso doméstico-abrevadero. Concluye que la recarga que recibe el acuífero asciende a 8.7 hm³ anuales, en tanto que la extracción anual era del orden de 4.9 hm³.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Fundación Gonzalo Río Arrónzte. I.A.P, 2003. USO DEL AGUA EN LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO: AGUA SUBTERRÁNEA.

Identifica la existencia de 374 aprovechamientos del agua subterránea que en conjunto extraen un volumen de 18 hm³/año, de los cuales el uso agrícola emplea el 66.7%, 27.8% más para el uso público-urbano y el 5.5% restante se destinaba a satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Realiza el análisis del agua y estudios isotópicos por deuterio y oxígeno 18.

La configuración de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) presenta una tendencia general del flujo siguiendo una dirección preferencial de oriente a poniente.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Fundación Gonzalo Río Arrónte. I.A.P, 2005. ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS SUBYACENTES AL LAGO DE PÁTZCUARO. PRIMERA ETAPA. Actualiza el censo en 450 aprovechamientos, de los cuales 105 son pozos, 290 norias y 55 manantiales. El volumen de extracción asciende a 35.8 hm³, de los cuales el 78.2% se destina al uso público-urbano, 16.6 % para uso doméstico-abrevadero y los 5.2 % restantes para uso agrícola. Los niveles estáticos varían desde algunos metros, en la zona cercana al Lago de Pátzcuaro, hasta los 200 m, conforme se asciende topográficamente.

Concluye que la recarga que recibe el acuífero era de 184.3 hm³/año. Estima la conductividad hidráulica del acuífero alojado en rocas basálticas entre 5×10^{-6} y 2×10^{-4} m/s, mientras que el coeficiente de transmisividad fluctúa entre 0.001 y 0.035 m²/s. En cuanto a la calidad del agua, los resultados de los análisis fisicoquímicos reportan valores similares en las concentraciones.

En los manantiales la temperatura ha disminuido en tanto que en las norias la temperatura y el pH son menores para el 2005.

Comisión Nacional del Agua, 2009. ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LAGUNILLAS-PÁTZCUARO, OSTULA, LÁZARO CÁRDENAS Y PLAYA AZUL, ESTADO DE MICHOACÁN. Realizado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S.A. de C.V.

Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua para contar con información necesaria 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 plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que se analizan y discuten en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

Fisiográficamente el acuífero se localiza en el Eje Neovolcánico (INEGI, 1991), que se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de diferentes composiciones, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Paleógeno-Neógeno (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente. La integran grandes sierras volcánicas, extensos derrames de lava, conos dispersos o en enjambre, amplios volcanes en escudo de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada "Eje Neovolcánico", que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos a lo largo del paralelo 19°. Estas estructuras representan el trazo de la gran Falla Clarión, cuya existencia fuera postulada desde el siglo pasado por el Barón Von Humboldt.

Otro rasgo esencial de la provincia es la existencia de las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos (Pátzcuaro, Cuitzeo, Texcoco, El Carmen, etc.) o por depósitos de lagos antiguos (Zumpango, Chalco, Xochimilco) así como diversos llanos en el Bajío Guanajuatense, etc.

Estos lagos se han formado por bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos volcánicos, o por el fallamiento, que es otro rasgo característico de la provincia.

Esta provincia a su vez se divide en subprovincias fisiográficas; el acuífero se encuentra dentro de la Subprovincia Neovolcánica Tarasca cuya topografía es muy accidentada, con laderas de fuertes pendientes y profundas barrancas. Las pendientes que se observan varían de 15 al 100%. Su cumbre es una cresta alargada que alcanza una altitud de 3,846 msnm y es la mayor elevación del estado de Michoacán.

Entre sus elevaciones más importantes destacan los Cerros Piedra del Horno y Cerro del Arco con 3,640 msnm, el Cerro del Tepetate con 3,040 msnm, el Cerro La Soledad con 2,700 msnm, el Cerro Prieto con 2,240 msnm y el Cerro La Cruz con 2,380 msnm.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, los climas presentes en el acuífero, son templados subhúmedos, presentando las siguientes variantes:

- C(w1). Templado subhúmedo con temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más cálido 22° C, precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias en verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- C(w2). Templado subhúmedo con temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más cálido 22° C, precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias en verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 y 10% del total anual.

Para el análisis climatológico se utilizó la información de las estaciones climatológicas Santa Fe de Quiroga y Pátzcuaro, que cuentan con registro para el periodo 1970 a 2005, con algunos años de interrupción.

De acuerdo con estos registros, el valor de la temperatura media anual es de 16.7° C, en tanto que para la precipitación se obtiene un valor promedio de 873 mm. El periodo de lluvias se presenta de junio a octubre con un promedio de 182.7 y 145.7 mm/mes, respectivamente en dichas estaciones. En cuanto a los datos de evaporación potencial, al igual que la mayoría de las estaciones climatológicas del país, cuenta con poca información.

Para el caso de la estación Pátzcuaro se tiene registro de datos continuos desde 1970 a 1992 (a excepción de 1990) y de 2002 a 2005. Tomando en cuenta estos valores, se obtiene una lámina media anual de 1446 mm/año. Para la estación Santa Fe Quiroga, el periodo de registro es de 1970 a 2002, sin datos para los años 1999 y 2001. Con esta información, se obtiene una evaporación promedio anual de 1625 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra dentro de la Región Hidrológica No.12 denominada Lerma-Santiago, que tiene una extensión aproximada de 129,263 km², cubriendo en su totalidad la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. El río Lerma es una de las corrientes más importantes del país ya que abarca una superficie de 34,294 km² en los estados de México, Michoacán y Jalisco. La Región Hidrológica 12 cubre las cuencas cerradas del río Grande de Morelia, que descarga en el Lago de Cuitzeo; la de lago de Pátzcuaro y las de los lagos de Villa Corona, Sayula, Atotonilco, San Marcos y Zapotitlán. El acuífero Lagunillas- Pátzcuaro se encuentra ubicado en la Cuenca del Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Lago de Yuriria.

La Cuenca del Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Lago de Yuriria comprende una superficie de 4,270 km² del estado de Michoacán. El lago de Pátzcuaro, el de Cuitzeo y la laguna de Yuriria tiene su origen en el sistema volcánico que fue afectado por fallas. Durante largos periodos de erosión las amplias depresiones han sido azolvadas, reflejándose principalmente en el Lago de Cuitzeo. La cuenca del acuífero Lagunillas Pátzcuaro es en una cuenca endorreica, cuyas corrientes superficiales fluyen preferentemente hacia el Lago de Pátzcuaro. No se cuenta con estaciones hidrométricas.

3.4 Geomorfología

Se distinguen diferentes unidades geomorfológicas: Sierras volcánicas, Cuencas Cerradas ocupadas por Lagos y Llanos. Las sierras están representadas por la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. El relieve estructural original de la provincia del Eje Neovolcánico está constituido esencialmente por rocas volcánicas del Cenozoico Superior. En la Sierra Madre del Sur afloran las rocas más antiguas del estado de Michoacán que son rocas metamórficas del Paleozoico Superior.

El lago de Pátzcuaro es el centro de la cuenca hidrológica Lagunillas-Pátzcuaro y está rodeado por montañas volcánicas con pendientes muy abruptas. Tiene una profundidad media de 5.0 m y una máxima de 11.0. Los suelos que componen la cuenca se originaron por cenizas volcánicas o rocas ígneas extrusivas y fueron modificados por la acción de los factores climáticos y la vegetación. Las rocas más antiguas identificadas en el área que cubre el acuífero corresponden a una secuencia de rocas volcánicas andesíticas, sedimentarias calcáreo-arcillosas y areniscas. Algunos depósitos lacustres del Plioceno-Cuaternario han sido parcialmente cubiertos por derrames de rocas basálticas, producto de la actividad volcánica reciente que forman los pequeños valles en la cuenca, con una elevación de 2040 msnm.

4. GEOLOGÍA

En el área del acuífero la geología está representada principalmente por rocas clásticas continentales, rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como rocas volcánicas asociadas a la actividad del Eje Neovolcánico, las cuales cubren a las distintas formaciones del Mesozoico y subyacen en ciertos lugares a los depósitos lacustres aluviales y basálticos del Cuaternario. En la superficie que cubre el acuífero se han reconocido las unidades geológicas mostradas en la figura 2, cuyas edades varían desde el Paleógeno-Neógeno al Reciente.

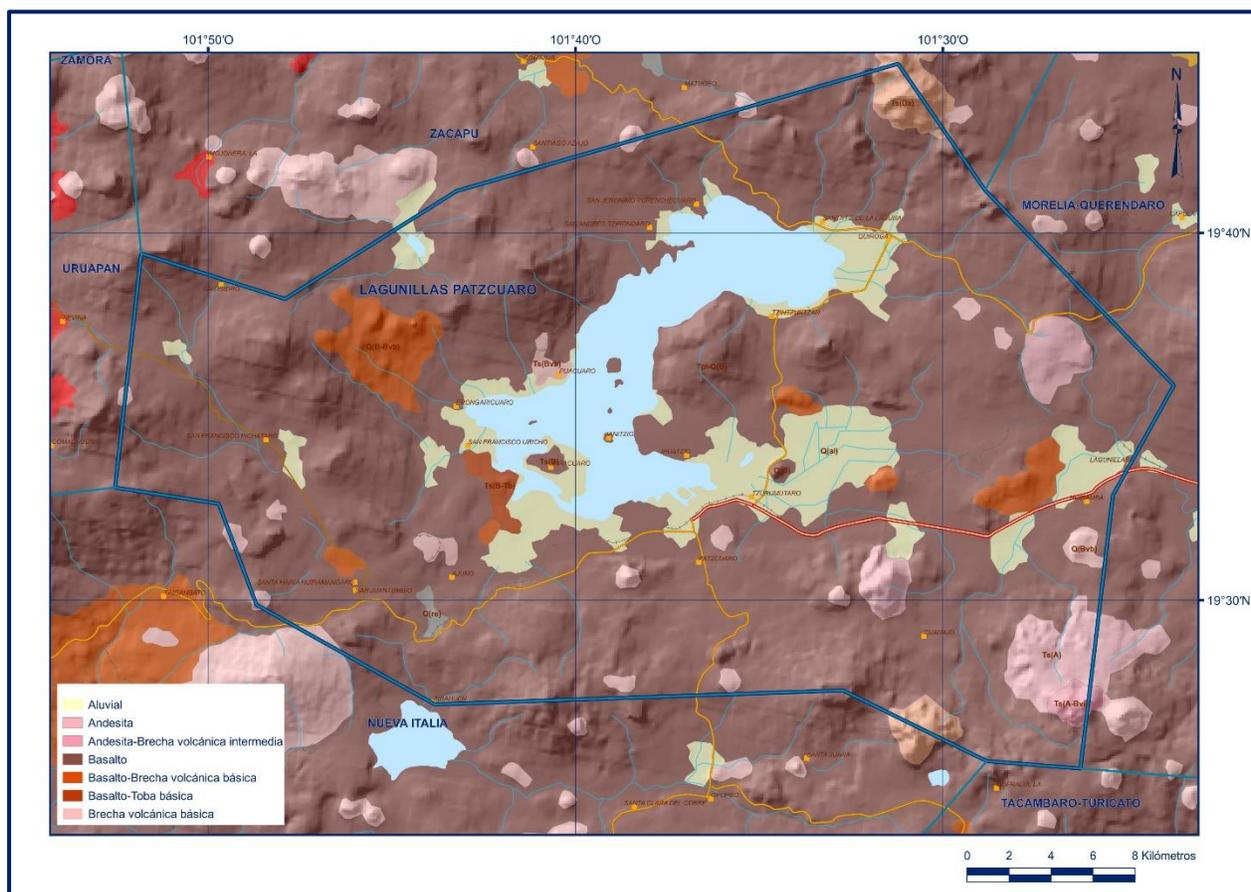


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

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

Paleógeno-Neógeno volcánico (extrusivo) Q(B – Bvb)

Esta unidad tiene una amplia distribución al noreste del estado y está conformada por las sucesiones volcánicas pseudoestratificadas de las áreas de Tafetán, Tzitzio, Morelia,

Mil Cumbres y Angangueo. Generalmente cubre en discordancia a las rocas del Grupo Balsas y está constituida por derrames de lavas basálticas a dacíticas, conglomerados volcánicos, ignimbritas, brechas andesíticas o riolíticas y algunos delgados horizontes de arenisca y limolita.

Plio-Cuaternario volcánico (Volcanoclástico) Q(B)

Esta unidad volcánica se presenta en una extensión de aproximadamente 20,000 km². En ella se encuentran más de 3,000 volcanes y constituye la estribación meridional del Eje Neovolcánico.

Este conjunto de rocas es el más joven de todos los conocidos en la entidad y sobreyace discordantemente a los demás. Está constituida por derrames andesíticos y dacíticos, domos riolíticos y dacíticos así como derrames basálticos asociados con conos de escoria.

Se considera que el Eje Neovolcánico fue producto por lo menos de dos eventos magmáticos: uno muy incipiente, durante el Mioceno-Plioceno, y otro más importante durante el Plioceno-Cuaternario.

Cuaternario Continental Q(al)

Estos depósitos recientes son de origen aluvial y se derivan, en su gran mayoría, de la erosión de rocas volcánicas. Generalmente estos aluviones se encuentran formando planicies en medio de cuencas endorreicas, formadas por el vulcanismo propio de la zona.

4.2 Geología estructural

El terreno estructural del Eje Neovolcánico está constituido por una cadena volcánica de edad pliocuaternaria, con una orientación diferente a la unidad estructural de la Sierra Madre del Sur. En Michoacán, el vulcanismo del Eje Neovolcánico está relacionado con la subducción de la Placa de Cocos. Este conjunto pliocuaternario es un modelo completo de arco magmático intracratónico sin deformación compresional y solo afectado por movimientos extensivos (fase tensional pliocuaternaria) ocasionados por la inestabilidad sísmica de la actual margen convergente pacífica.

Esta fase tensional originó fallas, fisuras y aparatos volcánicos (estratovolcanes, conos cineríticos) con orientación noreste-suroeste, por los que surgen grandes masas de rocas calcoalcalinas (basaltos, andesitas y dacitas originadas sobre una corteza

oceánica o intermedia, antes que por un vulcanismo de tipo margen continental activo.

La geología local y la tectónica del acuífero, se caracteriza por presentar una serie de conos monogenéticos contemporáneos con secuencias lacustres con edades $\leq 48,000$ años aproximadamente, cuya flora fósil evidencia un lago profundo y de aguas frías. Esta secuencia sobreyace a una serie “antigua” de derrames andesíticos de edad probable del Mioceno Tardío.

Sin embargo, una descripción estratigráfica detallada muestra que la distribución de unidades volcánico-lacustres está caracterizada por una serie de alternancias de diatomitas, lutitas que se intercalan con finas cenizas volcánicas, asociadas a una serie de discordancias producidas a su vez por sismos recurrentes, sistemas de fallas, aparición de volcanes, cambios climáticos y deslizamientos de masa, que fueron factores importantes para la formación de las estructuras locales y fracturas con orientación NW-SE, localizadas en mayor número en la zona oriente del acuífero.

El fracturamiento local podría ser un factor relevante, para obtener volúmenes de agua muy importantes. La formación de los aparatos volcánicos durante el Cuaternario puede ser la causa de la existencia de un gran número de manantiales, ya que es una de las zonas de más alta densidad de aparatos volcánicos. El manantial más importante del acuífero es el llamado “Chapultepec.

4.3 Geología del subsuelo

El acuífero se encuentra emplazado en material volcánico, en condiciones hidráulicas de tipo libre, heterogéneo, de espesor variable que puede alcanzar de 600 a 800 m. Su litología está conformada, en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y depósitos lacustres hacia el vaso del Lago de Pátzcuaro, que se depositaron sobre derrames volcánicos de rocas andesíticas y dacíticas, depósitos piroclásticos ácidos, domos riolíticos y dacíticos. Su frontera superior es el nivel freático, abierta al intercambio de flujo volumétrico, y sus barreras laterales están constituidas por rocas andesíticas compactas. Su basamento geohidrológico está representado por la presencia de rocas andesíticas y tobas de composición intermedia, es irregular y afectado por fracturas superficiales.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las propiedades hidrogeológicas de los materiales que constituyen el acuífero se

encuentran directamente relacionadas con las características texturales y estructurales de las rocas y los sedimentos que forman parte del ambiente hidrogeológico. El acuífero es de tipo libre y de características heterogéneas. Las rocas basálticas ocupan gran parte del área y ofrecen buenas posibilidades de producción.

Sus afloramientos están integrados por derrames, brechas y aglomerados, que presentan buena permeabilidad primaria y secundaria debido al fracturamiento. Por su textura vesicular y denso fracturamiento, tienen permeabilidad y capacidad de infiltración muy altas. Constituyen excelentes zonas de recarga en superficie y acuíferos de buena producción. Las rocas más antiguas de composición andesítica y basáltica, se consideran impermeables por su estructura masiva. El acuífero está formado por derrames basálticos, piroclásticos, materiales aluviales y depósitos lacustres.

Los tres primeros son los elementos más permeables y los últimos constituyen acuitardos de permeabilidad media a baja que originan condiciones locales de semiconfinamiento sobre los depósitos aluviales. De acuerdo al análisis de las unidades litológicas y a su permeabilidad, se definen tres unidades hidrogeológicas.

Unidad de material consolidado con posibilidades bajas. Se encuentra constituido por rocas volcánicas del Neógeno y del Reciente; presenta un fracturamiento moderado a alto e intemperismo ligero, por lo que la permeabilidad secundaria aumenta de media a alta. No obstante, su buena permeabilidad, las condiciones subterráneas no son propicias para almacenar el agua y constituir acuíferos; se presentan coronando las grandes estructuras y actúan generalmente como zonas de recarga.

Unidad de material consolidado con posibilidades altas. Está constituida por rocas volcánicas fracturadas de composición básica de edad cuaternaria, moderadamente intemperizadas. Presenta permeabilidad que varía de media a alta.

Unidad de material no consolidado con posibilidades altas. Constituida por sedimentos aluviales y depósitos piroclásticos que se depositaron en los valles tectónicos originados por el fallamiento. Su permeabilidad varía de media a alta.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio llevado a cabo en el 2009, se realizaron 5 pruebas de bombeo cuya duración varió de 1.5 a 15 horas, tanto en etapa de abatimiento como de

recuperación, interpretadas por métodos analíticos convencionales. De los resultados de su interpretación se deduce que los valores de conductividad hidráulica (K) varían de **0.1 a 5.3 m/d**, en tanto que la transmisividad (T) oscila entre **0.2 a 0.9 x 10⁻³ m²/s** (tabla 2). Los valores del coeficiente de almacenamiento, o rendimiento específico, para el caso de acuíferos libres, varía de **0.03 a 0.1**.

En la tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en tres pozos con clave CNA 1604-113, CNA 1604-241 y CNA 1604-250 que se ubican en la parte sureste, este y norte del acuífero, respectivamente, así como dos norias, CNA 1604-375 y CNA 1604-378, localizadas en el noroeste y suroeste del acuífero.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de bombeo

CLAVE	CNA1604-113		CNA1604-241		CNA1604-250		CNA1604-375		CNA1604-378	
Etapa	Abat.	Recup.								
Tiempo (min)	360	90	840	900	420	90	240	360	330	180
Nivel abat/recup (m)	5.646	5.795	69.170	69.170	22.491	22.618	0.475	0.575	1.225	1.208
Gasto (lps)	1.67	0.00	16.50	0.00	16.50	0.00	1.50	0.00	1.50	0.00
Profaprov. (m)	140.0		135.0		150.0		11.0		35.0	
NE./ND	75.81	81.456	6.140	75.310	13.090	35.581	6.45	6.925	15.0	16.255
Transmisividad T (m ² /día)	30.12		14.45		39.08		79.12		53.82	
Rendimiento Específico, Sy	0.03		0.05		0.33		0.39		0.10	
Conductividad hidráulica, K (m/día)	0.20		0.10		0.23		5.28		1.35	
Rendimiento específico Sy	0.03		0.05		0.39		0.33		0.1	

Los pozos se ubican en sedimentos aluviales y los valores de los parámetros hidráulicos son bajos, debido probablemente a que por su origen sedimentario los materiales aluviales presentan características anisotrópicas. Para los aprovechamientos CNA-1604-375 y CNA-1604-378, sus valores de transmisividad están asociados con un acuífero en un medio fracturado (basaltos), homogéneo y con transmisividad que, aunque es relativamente baja, es uniforme sobre el área influenciada por el bombeo.

5.3 Piezometría

Con respecto a la información piezométrica, se dispone de datos históricos para los años 2005 y 2009, que se tomaron en cuenta para las configuraciones respectivas.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2005 (figura 3) muestra

valores que varían, por efecto de la topografía, desde algunos metros en la zona aledaña al Lago de Pátzcuaro, hasta los 195 m que se registran en la porción occidental del acuífero. Al este, entre las localidades La Tinaja, Cuanajo, El Pedregal y Los Cerritos, las profundidades varían de 80 a 100 m; en tanto que, al noreste, en las inmediaciones de Quiroga, la profundidad promedio es de 120 m.

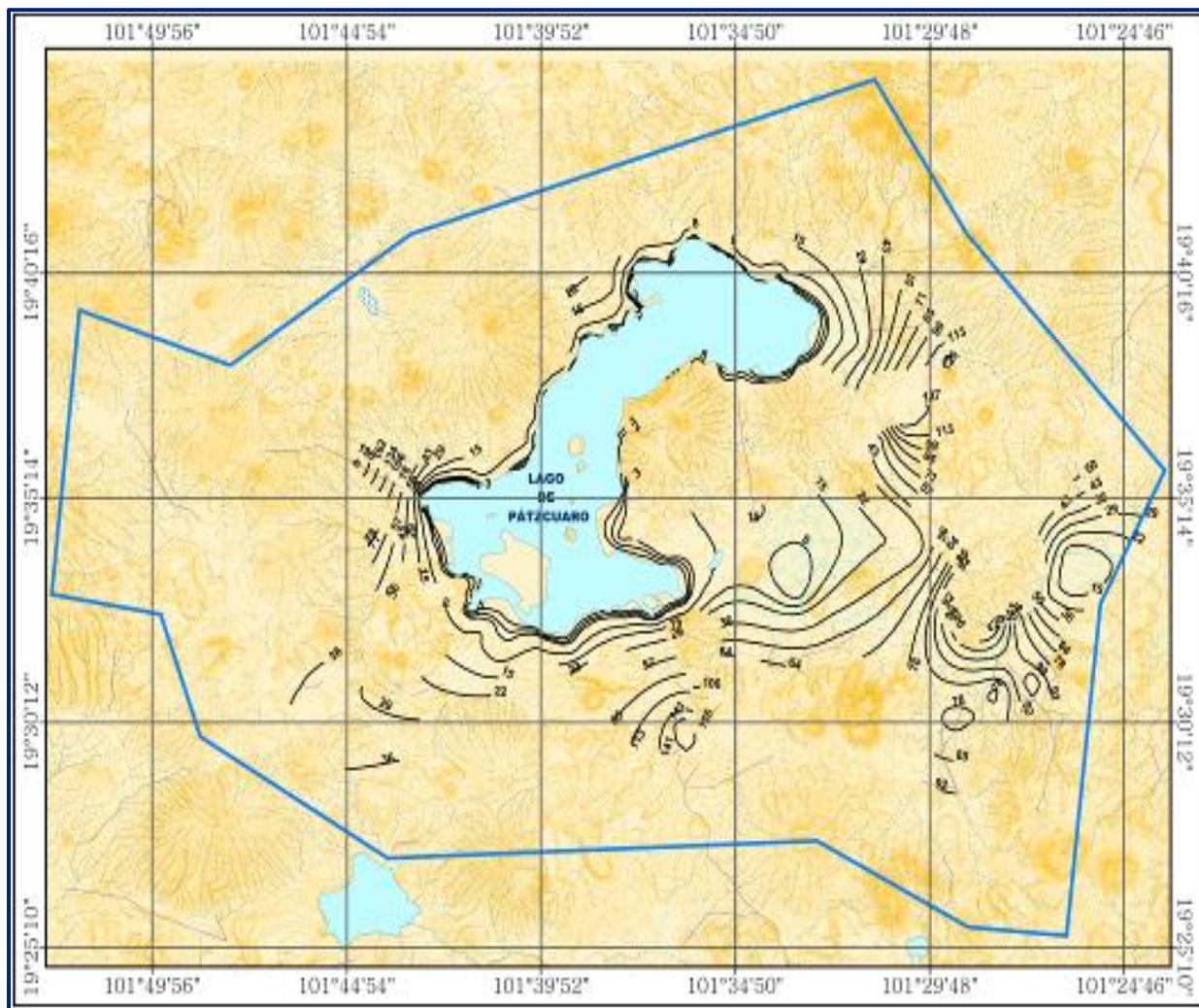


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2005)

Para el 2009 se registran los mismos valores extremos y su distribución geográfica es similar a la que se presentó en el 2005. En la periferia del Lago de Pátzcuaro, entre las localidades La Playa, Tzipeca, Arocutín, Tzintzuntzán y Ucasanastacua, se registran los valores más someros, de 1 a 5 m (figura 4).

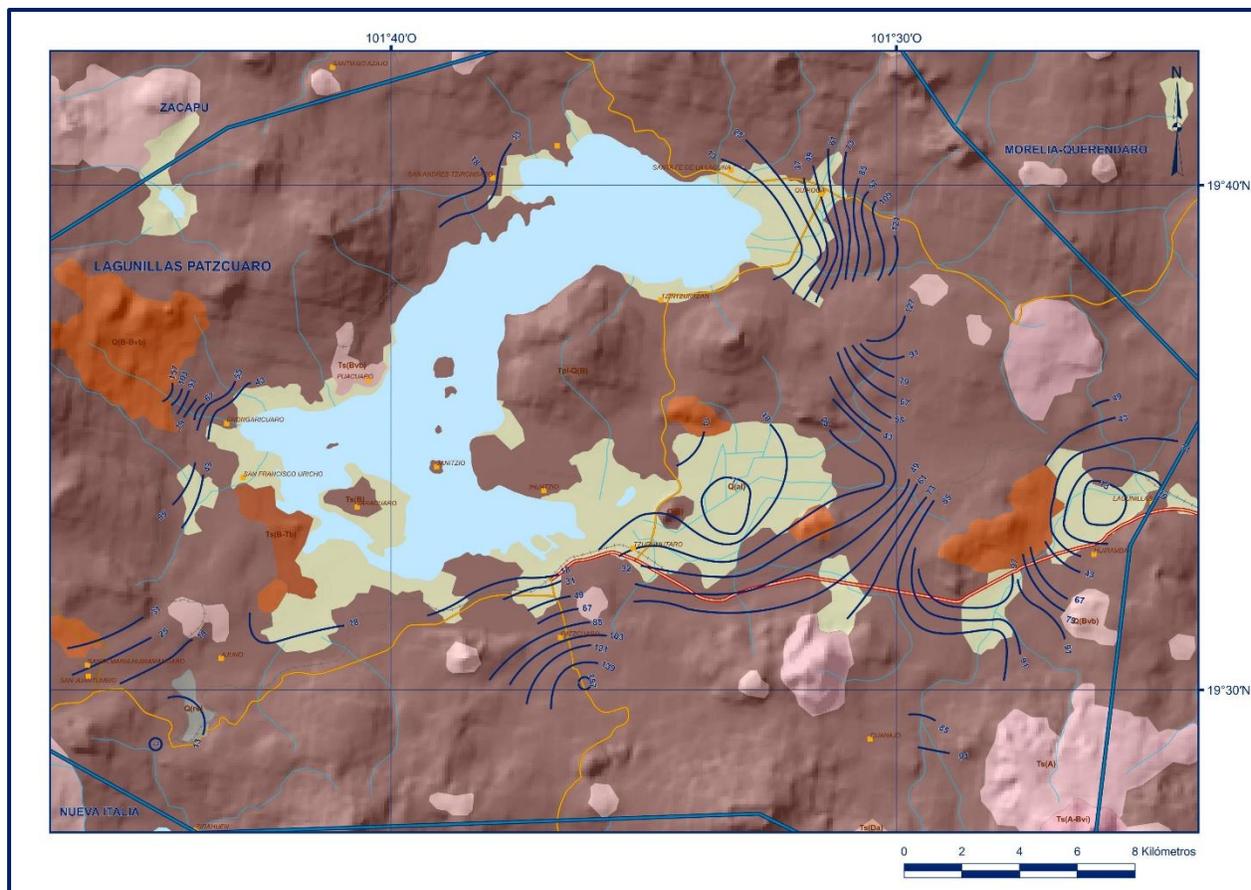


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

Al este del acuífero los valores superan los 80 m y hacia la localidad Coenembo la profundidad se incrementa a 115 m.

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático, las configuraciones para los años 2005 y 2009 presentan prácticamente la misma disposición de curvas, (figuras 5 y 6), en las que se puede observar que el flujo subterráneo es concéntrico hacia el Lago de Pátzcuaro, desde sus fronteras topográficas que constituyen las sierras que delimitan el acuífero.

En la porción noroeste la dirección preferencial del flujo subterráneo es de noreste a sureste, paralela a los escurrimientos que se presentan entre los Cerros El Chivo y El Capen ubicados fuera de la zona de explotación.

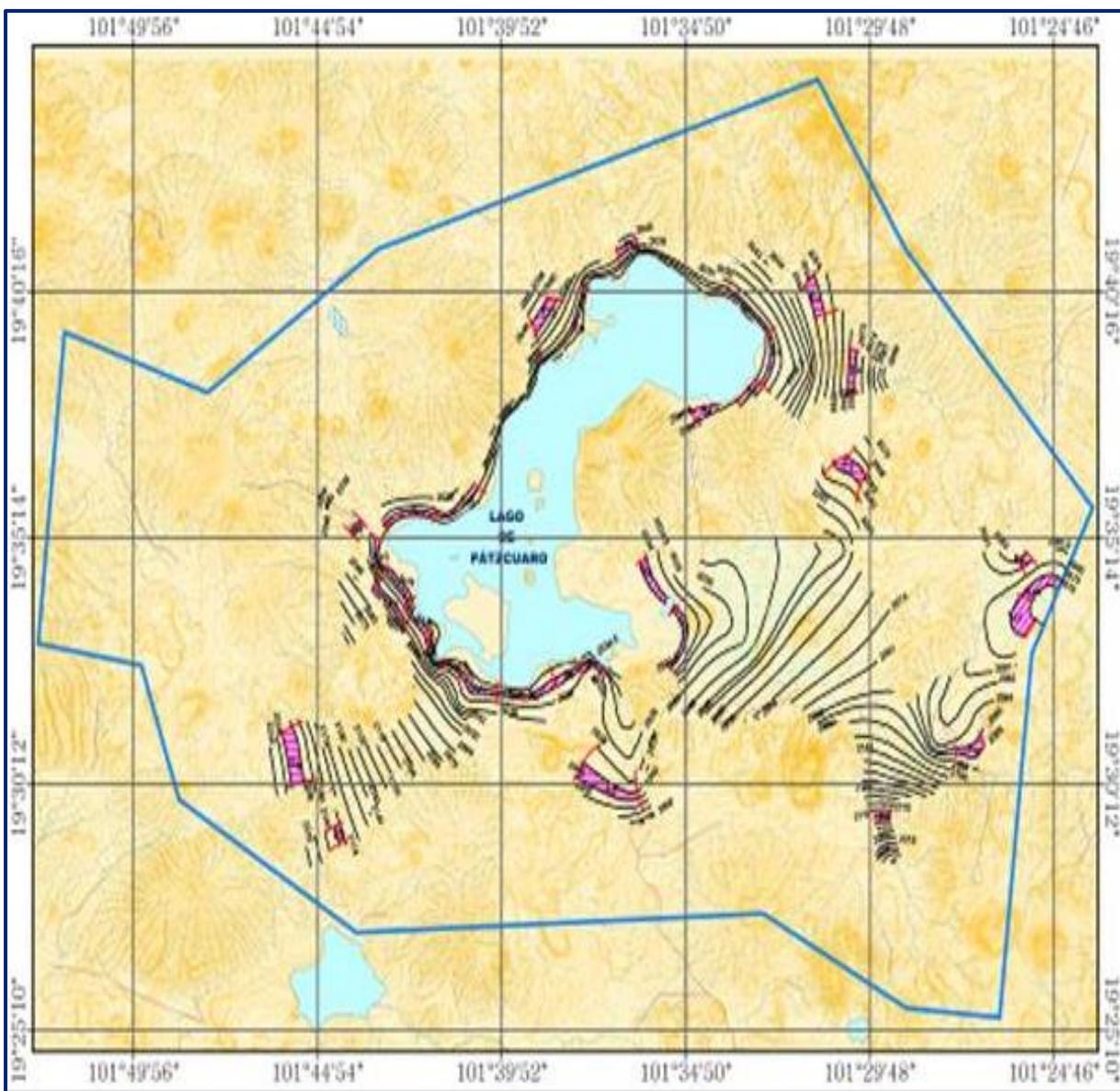


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2005)

Las condiciones hidrogeológicas y topográficas tienen una influencia directa en la distribución espacial de las concentraciones de los diferentes parámetros químicos. Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 871 a 1956 ppm.

En general, las menores concentraciones fueron identificadas en las porciones occidental y oriental del acuífero, consideradas como las principales zonas de recarga al acuífero y donde existen manantiales. A partir de estas zonas se incrementa gradualmente la concentración hacia la periferia del Lago de Pátzcuaro.

La familia de agua predominante es la bicarbonatada-mixta. 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. Sin embargo, 4 aprovechamientos sobrepasan el límite máximo permisible de Fe y Mn y 6 exceden los límites permisibles establecidos para coliformes totales y fecales.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para determinar la calidad del agua para uso agrícola, los resultados indican que en el acuífero se presentan tres clases de agua, la primera es C1S1 que se presenta en 6 muestras, que representa agua de baja salinidad (C1) con bajo contenido de sodio (S1); C2S1 en 3 muestras, y C3S1 en 1 muestra que indica el incremento en la salinidad del agua, pero sin incremento de sodio intercambiable.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2009, se registraron un total de 400 aprovechamientos, de los cuales 78 son pozos, 289 norias y 33 manantiales.

De total de obras, 371 están activas y las 29 (12 pozos y 17 norias) restantes se encuentran actualmente inactivos. A pesar de que los pobladores manifiestan que el caudal en los manantiales ha disminuido, continúan activos en su totalidad abasteciendo a las diferentes comunidades, cabe mencionar que en algunos casos debido a la calidad del agua subterránea su uso se ha limitado a uso doméstico y pecuario.

Del total de las norias, 244 se destinan para uso doméstico, 30 para uso público urbano; 12 para uso pecuario y 3 son para actividades agrícolas. De los pozos, 67 son para uso público-urbano, 6 para actividades agrícolas, 2 para uso doméstico, 2 para servicios y 1 es para uso pecuario. El uso de los 33 manantiales es como sigue: 27 para público urbano, 3 para uso doméstico, 2 para actividades agrícolas y 1 se utiliza en actividades pecuarias.

El volumen de extracción estimado es de **15.0 hm³/año** por la extracción a través de pozos y norias. Adicionalmente 16.4 hm³/año provienen de la descarga de manantiales.

Del volumen de extracción por bombeo, 0.2 hm³ (1.3 %) se destinan al uso agrícola, 14.5 más (96.7%) para dotación de agua potable a la población de las comunidades de la región, 0.2 más (1.3 %) para servicios y los 0.1 hm³ anuales restantes (0.7 %) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero. De igual manera, de los 16.6 hm³ anuales que descargan los manantiales, 16.0 hm³ (97.6%) se destinan al uso agrícola, y los 0.4 hm³ anuales restantes (2.4%) para dotación de agua potable a la población de las comunidades de la región.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance se planteó para el periodo 2005-2009 en una superficie de 239 km² en la que se encuentran dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por dos procesos naturales principales por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas (Rpu), constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Dado que no existe información para estimar estas componentes de recarga inducida, su valor está implícito en el volumen de recarga vertical.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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 definida por la expresión:

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

Dónde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entrada por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- Dm:** Descarga por manantiales
- ΔV :** Cambio de almacenamiento
- S:** Coeficiente de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un periodo considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado. La Ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

$$Q = B * i * T$$

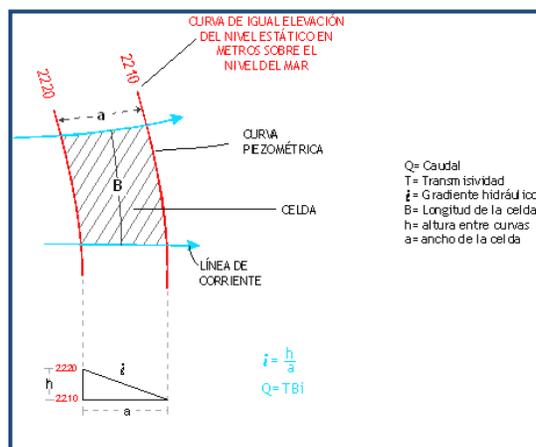
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



Las principales zonas de recarga de agua subterránea, de acuerdo a la geología, se localizan en los basaltos fracturados, en las partes altas que circundan al valle; además en la subcuenca hidrológica de Lagunillas existen algunas aportaciones en la parte este, a la altura de los poblados La Caja, El Pedregal y Canacucho, representadas por las celdas E4, E5 y E6, respectivamente, mostradas en las figuras 5 y 6, que aunque no pertenecen a la cuenca del Lago de Pátzcuaro, si se incluyen dentro del sistema del acuífero Lagunillas-Pátzcuaro y por ello se incluyeron en el balance.

Los resultados de cada uno de los canales de entradas aparecen en las tablas 3 y 4 para los años 2005 y 2009, respectivamente.

En ellas se observa, que los volúmenes de entradas horizontales provenientes de las montañas que rodean al valle son del orden de los 19.5 hm³/año para el 2005 y 20.0 hm³/año para 2009, por lo que su promedio es de **19.8 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo para el año de 2005.

CELDA	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3/s)	VOL. ANUAL (hm^3)
ENTRADAS HORIZONTALES					
E ₁	1.620	1433.5	0.00775	0.0180	0.6
E ₂	1.680	1658.5	0.01133	0.0316	1.0
E ₃	3.380	1415.5	0.00378	0.0181	0.6
E ₄	1.950	576.0	0.00251	0.0028	0.1
E ₅	2.760	1460.0	0.00606	0.0244	0.8
E ₆	1.760	701.5	0.03471	0.0429	1.3
E ₇	5.060	3042.0	0.00885	0.1362	4.3
E ₈	1.833	698.5	0.02003	0.0256	0.9
E ₉	4.888	2123.5	0.02339	0.2428	7.6
E ₁₀	1.560	2099.0	0.01004	0.0329	1.0
E ₁₁	1.280	679.5	0.00153	0.0013	0.0
E ₁₂	1.600	1480.5	0.00910	0.0216	0.7
E ₁₃	2.600	1056.5	0.00671	0.0184	0.6
TOTAL					19.5

Tabla 4. Cálculo entradas por flujo subterráneo para el año de 2009.

CELDA	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (m)	i (m/m)	Q (m^3/s)	VOL. ANUAL (hm^3)
ENTRADAS HORIZONTALES					
E ₁	1.620	1612.5	0.005	0.013	0.4
E ₂	1.680	1762.0	0.013	0.039	1.2
E ₃	3.380	1382.0	0.004	0.018	0.6
E ₄	1.950	605.5	0.002	0.003	0.1
E ₅	2.760	1465.0	0.006	0.024	0.7
E ₆	1.760	769.0	0.035	0.047	1.5
E ₇	5.060	2568.5	0.006	0.078	2.5
E ₈	1.833	833.5	0.030	0.046	1.4
E ₉	4.888	2164.5	0.028	0.300	9.5
E ₁₀	1.560	2046.0	0.007	0.021	0.7
E ₁₁	1.280	696.0	0.002	0.001	0.1
E ₁₂	1.600	1729.0	0.008	0.023	0.7
E ₁₃	2.600	1044.0	0.007	0.018	0.6
TOTAL					20.0

Los valores T utilizados para el cálculo de entradas y salidas corresponden al promedio obtenido de las pruebas de bombeo realizadas en el 2009, adaptadas al espesor saturado de cada celda.

7.2 Salidas

Las descargas en el acuífero ocurren principalmente por evapotranspiración (ETR), bombeo (B) y salidas por flujo subterráneo (Sh) que descargan hacia el Lago de Pátzcuaro y también mediante la descarga de manantiales (Dm).

De acuerdo a la información piezométrica e hidrogeológica disponible, no existen evidencias de salidas de flujo regional hacia otras cuencas y no se aprecia flujo base a lo largo de los arroyos existentes.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **15.0 hm³/año**.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

Esta componente está representada por la descarga a la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora. Es importante remarcar que este volumen, se transfiere de la superficie del terreno (inmediaciones del lago) hacia la atmósfera, que es diferente de la que se transfiere de la superficie libre del agua en el lago hacia la atmósfera. El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal en la zona aledaña al Lago de Pátzcuaro.

Para la estimación de la evaporación se utilizó la metodología de White (1973), la cual considera un porcentaje de lo medido en el tanque evaporímetro, donde la evaporación es comparativamente más alta en los niveles freáticos menores a 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son mayores a 300 cm, según White citado por Keith, como se muestra en la figura 8.

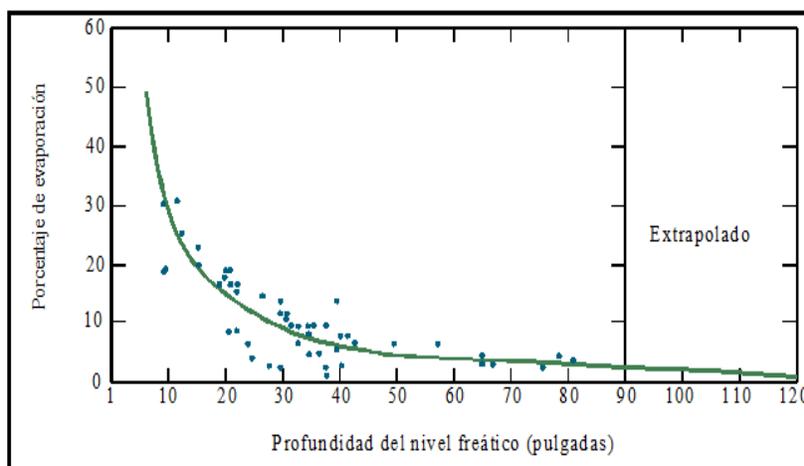


Figura 8. Evaporación del agua subterránea en % como una función de la profundidad y del nivel freático

De acuerdo a lo anterior, se estima que el volumen de evapotranspiración para el año 2005 es de 2.15 hm³ y para el año 2009 de 1.76 hm³, por lo que su promedio anual es de 2.0 hm³.

En la tabla 5, se muestran los porcentajes respecto al volumen evapotranspirado en promedio de los años de balance para las profundidades de 100, 200 y 300 cm.

Tabla 5. Volumen evapotranspirado respecto al porcentaje estimado

PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	% DE EVAPORACIÓN (ESTIMADO GRAFICA DE WHITE)	EVAPORACIÓN (mm/año)	ÁREA (Km ²)	VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm ³)
AÑO 2005				
100	10.0	1,594.4	6.93	1.105
200	7.0	1,594.4	5.79	0.646
300	4.0	1,594.4	6.19	0.395
TOTAL				2.15
AÑO 2009				
100	10.0	1,594.4	5.68	0.905
200	7.0	1,594.4	4.76	0.531
300	4.0	1,594.4	5.11	0.326
TOTAL				1.76

7.2.3 Descarga por manantiales (Dm)

Dentro del acuífero existen en total 33 manantiales, que en conjunto descargan un volumen de **16.4 hm³/año**.

7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas horizontales se calculan de la misma manera como se evalúan las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en las figuras 5 y 6. Se identificaron diferentes áreas de descarga, las cuales se ubican en su mayoría en la periferia del Lago de Pátzcuaro, otras descargas se encuentran en la subcuenca de Lagunillas en su porción oriental.

En las tablas 6 y 7 se muestran los resultados del cálculo. El promedio para el periodo 2005-2009 es de **10.3 hm³ anuales**.

Tabla 6. Cálculo de salidas por flujo subterráneo en el año 2005

CELDA	T (10^{-3} m ² /s)	B (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
SALIDAS HORIZONTALES					
S ₁	3.120	2615.1	0.0034	0.0277	0.9
S ₂	3.120	2147.3	0.0029	0.0194	0.6
S ₃	3.120	1201.8	0.0020	0.0075	0.2
S ₄	3.120	1192.6	0.0005	0.0019	0.1
S ₅	3.120	2454.4	0.0007	0.0054	0.2
S ₆	3.120	2592.0	0.0010	0.0081	0.3
S ₇	3.120	1114.1	0.0048	0.0167	0.5
S ₈	3.120	1268.5	0.0076	0.0301	0.9
S ₉	3.120	1688.6	0.0021	0.0111	0.4
S ₁₀	3.120	1254.1	0.0031	0.0121	0.4
S ₁₁	3.120	2002.7	0.0029	0.0181	0.6
S ₁₂	3.120	1022.2	0.0038	0.0121	0.4
S ₁₃	3.120	1333.0	0.0053	0.0220	0.7
S ₁₄	3.120	1770.0	0.0050	0.0276	0.9
S ₁₅	3.120	1749.5	0.0030	0.0164	0.5
S ₁₆	3.120	1338.7	0.0025	0.0104	0.3
S ₁₇	3.120	2446.2	0.0023	0.0176	0.6
S ₁₈	3.120	2446.5	0.0023	0.0176	0.6
S ₁₉	3.120	3505.4	0.0057	0.0623	2.0
S ₂₀	4.140	1855.5	0.0021	0.0161	0.5
S ₂₁	2.300	1487.1	0.0016	0.0055	0.2
TOTAL					11.8

Tabla 7. Cálculo Salidas por flujo subterráneo en el año 2009

CELDA	T (10^{-3} m ² /s)	B (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)	VOL. ANUAL (hm ³)
SALIDAS HORIZONTALES					
S ₁	3.120	2521.2	0.002	0.016	0.5
S ₂	3.120	1943.8	0.002	0.012	0.4
S ₃	3.120	2521.2	0.002	0.016	0.5
S ₄	3.120	908.8	0.001	0.003	0.1
S ₅	3.120	2602.6	0.001	0.008	0.3
S ₆	3.120	2443.9	0.001	0.008	0.3
S ₇	3.120	1431.5	0.003	0.013	0.4
S ₈	3.120	1065.1	0.001	0.003	0.1
S ₉	3.120	1584.3	0.001	0.005	0.2
S ₁₀	3.120	1308.9	0.002	0.008	0.3
S ₁₁	3.120	1891.7	0.002	0.012	0.4
S ₁₂	3.120	1129.1	0.003	0.011	0.3
S ₁₃	3.120	1330.2	0.004	0.017	0.5
S ₁₄	3.120	1807.8	0.004	0.023	0.7
S ₁₅	3.120	1550.1	0.002	0.010	0.3
S ₁₆	3.120	1581.4	0.002	0.010	0.3
S ₁₇	3.120	2545.9	0.002	0.016	0.5
S ₁₈	3.120	1742.9	0.002	0.011	0.3
S ₁₉	3.120	3446.0	0.005	0.054	1.7
S ₂₀	4.140	2210.7	0.002	0.018	0.6
S ₂₁	2.300	1467.9	0.001	0.003	0.1
TOTAL					8.8

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

El cambio de almacenamiento está definido por la expresión:

$$\text{Cambio de almacenamiento} = \Delta h * \text{Area} * \text{Coeficiente de almacenamiento (Sy)}$$

Para la estimación del cambio de almacenamiento se utilizó el software Surfer V.8.01, a partir de la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo de 2005-2009 que se muestra en la figura 7.

El resultado arroja un valor de -80.5 hm^3 de volumen drenado del acuífero que aplicado al área de balance de 239 km^2 resulta un abatimiento promedio de 0.34 m anuales. Al considerar un coeficiente de almacenamiento (o rendimiento específico) de 0.03 (CONAGUA, 2009), el resultado es:

$$\text{Cambio de almacenamiento} = (-0.34\text{m}) (239 \text{ km}^2) (0.03) = - 2.4 \text{ hm}^3$$

$$\Delta V(S) = -2.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes que intervienen en la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical, despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR + Dm \pm \Delta V(S) - E_h \\ R_v &= 15.0 + 10.3 + 2.0 + 16.4 - 2.4 - 19.8 \\ R_v &= 21.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

En este valor está incluida la recarga inducida que se produce por retornos agrícolas del agua de los manantiales y de las fugas en los sistemas de distribución de agua potable.

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas.

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 21.5 + 19.8 \\ R &= 41.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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 **41.3 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 el caso del acuífero su valor es de **28.7 hm³ anuales**, que corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el Lago de Pátzcuaro, a la evapotranspiración y a la descarga a través de los manantiales.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **15,070,671 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 41.3 - 28.7 - 15.070671 \\ \text{DMA} &= -2.470671 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **2,470,671 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Estudio de Actualización de Mediciones Piezométricas en las Unidades Hidrogeológicas de: Tacámbaro-Turicato, La Huacana, Lázaro Cárdenas y Playa Azul, estado de Michoacán. Realizado por la empresa Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S.C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Estudio Geohidrológico de los Valles de Zacapu y Pátzcuaro, Estado de Michoacán.