

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EMILIANO ZAPATA (2904), ESTADO
DE TLAXCALA**

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.....	5
3.1	Provincia fisiográfica	5
3.2	Clima	5
3.3	Hidrografía.....	6
3.4	Geomorfología	6
4	GEOLOGÍA	6
4.1	Estratigrafía.....	7
4.2	Geología estructural	8
4.3	Geología del subsuelo	9
5	HIDROGEOLOGÍA.....	10
5.1	Tipo de acuífero	10
5.2	Parámetros hidráulicos	10
5.3	Piezometría	11
5.4	Comportamiento hidráulico	11
5.4.1	Profundidad al nivel estático	11
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	12
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	13
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	14
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	15
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	15
7.1	Entradas.....	16
7.1.1	Recarga vertical	16
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	17
7.2	Salidas.....	18
7.2.1	Bombeo (B)	18
7.2.2	Descarga de manantiales (Dm).....	18
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	18
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S)	18
8	DISPONIBILIDAD	19
8.1	Recarga total media anual (R)	20
8.2	Descarga natural comprometida (DNC)	20
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	20
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	21

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 Emiliano Zapata, definido con la clave 2904 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del estado de Tlaxcala, entre los paralelos 19°25' y 19°44' de latitud norte y entre los meridianos 97°52 y a 98°09' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 267 km².

Limita al norte con el acuífero Tecolutla, que pertenece al estado de Veracruz, al sur con el acuífero Huamantla y al oeste con el acuífero Alto Atoyac, ambos pertenecientes al estado de Tlaxcala (figura 1).

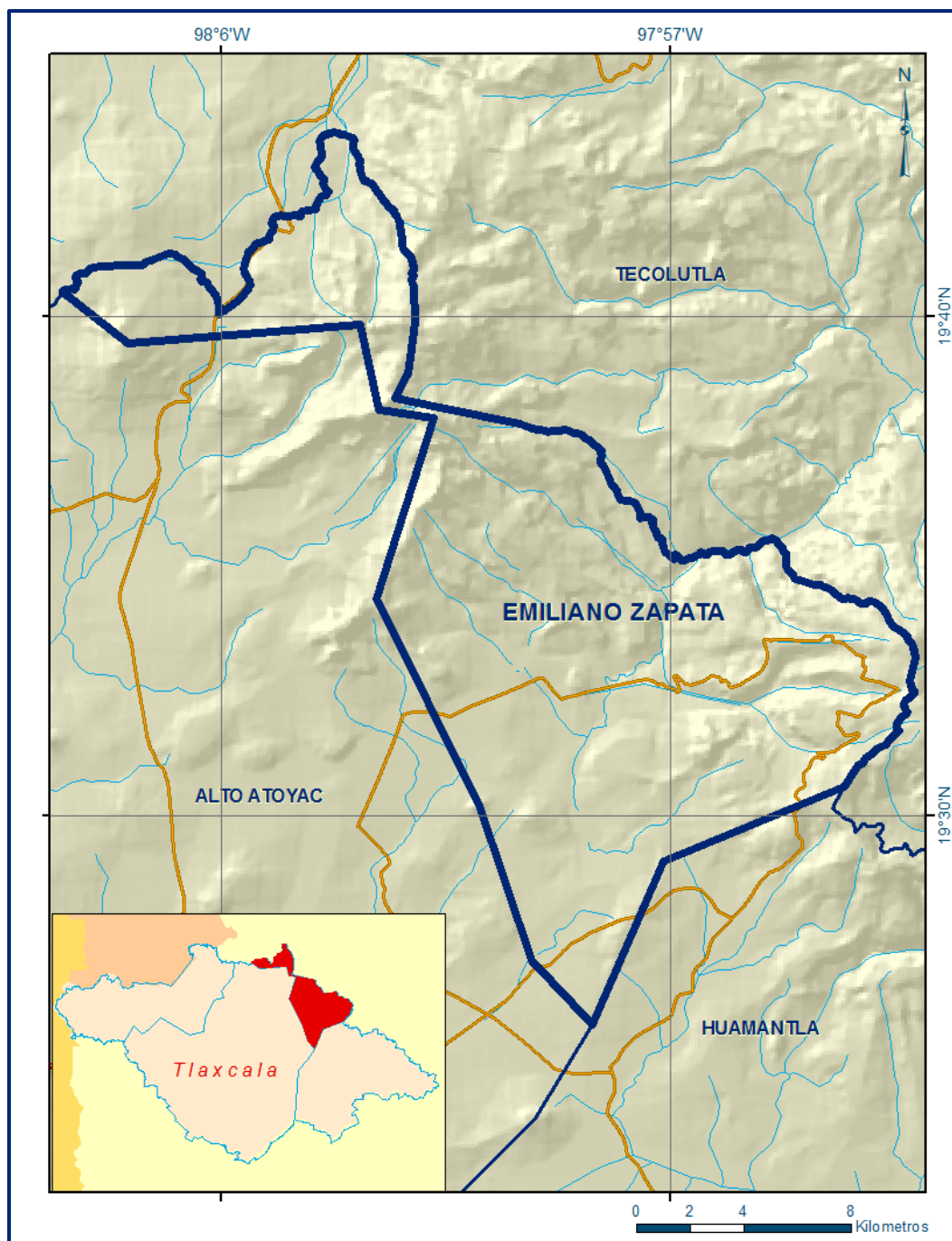


Figura 1. Localización del acuífero Emiliano Zapata

Geopolíticamente comprende totalmente a los municipios de Emiliano Zapata y Lázaro Cárdenas y parcialmente a los municipios de Terrenate, Tlaxco y Tetla de La Solidaridad.

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

ACUÍFERO 2904 EMILIANO ZAPATA							
Vértice	Longitud oeste			Latitud norte			Observaciones
	grados	minutos	segundos	grados	minutos	segundos	
1	98	9	11.3	19	40	29	1 a 2 límite estatal
2	97	53	29.3	19	30	34.3	
3	97	57	7.4	19	29	4.6	
4	97	58	32.6	19	25	47.2	
5	97	59	45.9	19	27	4.5	
6	98	0	49.2	19	30	11.5	
7	98	2	53	19	34	19.9	
8	98	1	43.7	19	37	58.4	
9	98	2	50	19	38	8.4	
10	98	3	13.3	19	39	49.6	
11	98	7	52.2	19	39	27.1	
1	98	9	11.3	19	40	29	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Emiliano Zapata pertenece al Organismo de Cuenca IV “Balsas” y es jurisdicción territorial del estado de Tlaxcala. Solamente una pequeña porción al sur del territorio del acuífero se encuentra vedado y está sujeta a las disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de la cuenca cerrada denominada Oriental, en los Estados de Puebla y Tlaxcala”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de agosto de 1954.

Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. En la superficie restante del acuífero no rige ningún decreto de veda.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El principal usuario es el público-urbano. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No se han realizado estudios geohidrológicos de evaluación en el territorio que comprende el acuífero, el único que abarca su superficie es el estudio denominado:

CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO EMILIANO ZAPATA, TLAXCALA, elaborado por la empresa Proyectos, Estudios y Sistemas S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz, 1964), Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac.

El tipo de topoformas que presenta son variables, y están representadas principalmente por sierras volcánicas, hacia el poniente en la parte alta, así como lomeríos y mesetas en la porción sur.

3.2 Clima

El clima de la región es Templado Subhúmedo con Lluvias en Verano, denominado C(w). Pequeñas porciones en la región noreste corresponden al clima, Semifrío Subhúmedo con Lluvias en Verano CE (w).

Presenta una temperatura media anual que varía entre 12 y 14 °C, los valores máximos se registran de abril a junio y las menores en diciembre y enero. Respecto a la precipitación pluvial, el periodo de lluvias se presenta de mayo a octubre y su valor promedio es 750 mm, con valores extremos de 880 mm en las partes montañosas y 700 mm en las regiones topográficamente más bajas.

En lo que respecta a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de 1,550 mm (CONAGUA, Dirección Local en Tlaxcala).

3.3 Hidrografía

El acuífero Emiliano Zapata está ubicado en la Región Hidrológica 18 “Balsas”, cuenca del Río Atoyac y subcuencas de Tecuantepec-Apulco y Apizaco. En la zona de estudio existe una vertiente que se integra a la corriente proveniente de la zona oriente, conformada por los ríos La Mancera y Tenexac que es continuación del río Tlacaxolo, parte de las aguas que fluyen por los ríos llegan a las presas Lázaro Cárdenas y Tenexac, localizadas en la zona de estudio. Los ríos en épocas de lluvias conducen considerables volúmenes de agua, por su parte en épocas de estiaje en general no escurre agua por ellos.

3.4 Geomorfología

El área donde se localiza el acuífero de Emiliano Zapata está delimitada en sus porciones norte y oriente, principalmente por sierras constituidas por rocas volcánicas escarpadas, en tanto que hacia el sur predominan las estructuras volcánicas de menor elevación que sobresalen en el valle. El drenaje es de tipo radial y subparalelo.

4 GEOLOGÍA

La geología presente en el área ha sido moldeada por una gran actividad volcánica, la cual le ha dado al relieve un perfil característico. Específicamente la zona cubierta por el acuífero representa el borde de una serranía. (figura 2).

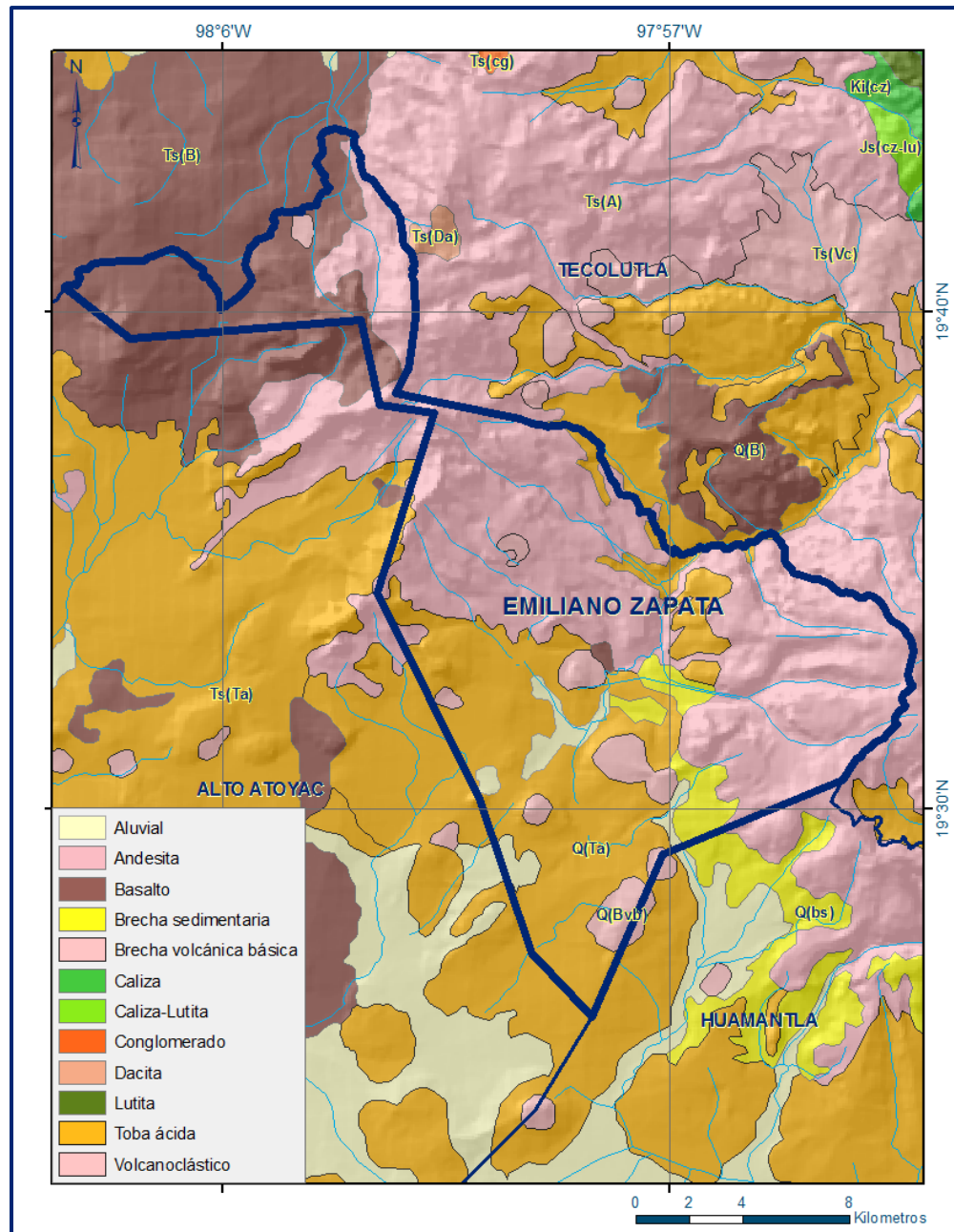


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la zona cubierta por el acuífero afloran rocas ígneas extrusivas del Terciario al Cuaternario de tipo (andesitas, riolitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas) así como sedimentos aluviales. Con base en la información geológica superficial del Servicio Geológico Mexicano, se identifican seis unidades litológicas, de las cuales en el acuífero afloran tobas riolíticas y andesíticas, andesita, basalto y depósitos aluviales.

Las unidades estratigráficas más antiguas del estado son las rocas sedimentarias; en particular los depósitos clásticos formados en un ambiente continental lacustre que, de acuerdo con su litología, son clasificados como asociaciones alternantes de areniscas y limolitas y de areniscas y calizas.

Es posible que estas rocas pertenezcan al Terciario Inferior ya que se encuentran cubiertas por derrames andesíticos y tobas intermedias del Terciario Superior (Mioceno). Estas rocas no afloran en la superficie cubierta por el acuífero Las riolitas y tobas ácidas, que aparecen restringidas a unos cuantos afloramientos dentro del estado, también pertenecen al Terciario Superior (Plioceno).

En este mismo periodo, los agentes de denudación fluviales y fluvio-glaciares iniciaron una actividad intensa que condujo a la nivelación de un relieve activo. Así se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares (brechas sedimentarias) en las faldas de volcanes andesíticos como La Malinche, entre otros.

La actividad volcánica basáltica comenzó en el Terciario Superior y alcanzó una gran intensidad en el Cuaternario (Pleistoceno), dejando distribuidas numerosas estructuras volcánicas relativamente pequeñas. Durante los últimos derrames basálticos que tuvieron lugar en Tlaxcala, se cerraron algunos valles y se formaron cuencas endorréicas, algunas de las cuales siguen siendo rellenadas por productos de la denudación del relieve, esto es, por aluviones y depósitos lacustres.

Las estructuras geológicas más importantes de Tlaxcala son volcánicas; entre ellas destaca, como uno de los seis estratovolcanes más grandes del país, la majestuosa Malinche, la cual se encuentra en su mayor parte dentro de los límites del estado.

En toda la entidad hay numerosas estructuras volcánicas menores de tipo basáltico. Además de los volcanes, con sus aparatos y derrames lávicos, se presentan otras estructuras, como fallas y fracturas, que han contribuido a modelar el relieve del estado y que están asociadas íntimamente a la actividad volcánica y tectónica continental.

4.2 Geología estructural

El área de estudio se ubica en la parte central de la República Mexicana, dentro de la Faja Volcánica Mexicana (FVM) o Eje Neovolcánico. Este territorio accidentado se caracteriza por la presencia de mesetas, lomeríos, llanuras, cañones y el volcán La Malinche o Matlacuéyatl (4461 m.s.n.m.).

Es importante destacar la presencia de plegamientos que se orientan predominantemente en dirección E-O, dando origen a depresiones, fallas y dislocaciones que en la actualidad están generando sismos de magnitud moderada y pequeña.

Los principales sistemas de fallas que existen en esta región son las Fallas Tlaxcala, Zacatelco, Huejotzingo y Tepeaca, las dos primeras se localizan al centro y sur del estado de Tlaxcala, respectivamente; mientras que las otras dos en el estado de Puebla.

Las cuatro fallas son de tipo normal y están orientadas en dirección E-O, sin embargo las dos primeras, presentan buzamiento hacia el sur y las otras dos hacia el norte, formando el Graben de Puebla (Mooser *et al.*, 1996; Santoyo *et al.*, 2005 y García-Palomo, comunicación personal). Otras fallas menores en longitud son El Rosario, Acopinalco, Atotonilco, Alzayanca y Española, todas con diversas orientaciones y localizadas en mayor número en el extremo Norte de este estado.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos ejecutados como parte del estudio realizado en el 2010 y las evidencias de la geología superficial, es posible definir que en el subsuelo se presentan basaltos, andesitas, brechas volcánicas, dacitas y tobas; sobreyacidas por delgados espesores de depósitos aluviales y fluviales, así como de piedemonte hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero.

El acuífero se encuentra alojado, en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales producto de la erosión de las partes altas de las sierras, que han sido transportados por abanicos aluviales y por escurrimientos superficiales para ser depositados en los cauces de los arroyos y en los valles, así como brechas sedimentarias y conglomerados. Su espesor es variable y sólo alcanza algunas decenas de metros en las zonas aledañas a los cauces de los ríos. La parte inferior está conformada por rocas volcánicas (basaltos, andesitas, brechas volcánicas, dacitas y tobas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Estas mismas rocas constituyen las barreras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico, cuando desaparece su fracturamiento. A mayor profundidad el basamento está conformado por las rocas cretácicas que conforman una secuencia de lutitas y lutitas.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la interpretación de la geología del subsuelo y las características de las unidades litológicas que lo conforman, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, de **tipo libre**, conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente.

El medio granular está conformado por los depósitos no consolidados y semi-consolidados que incluyen materiales clásticos de granulometría diversa, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en las sierras que delimitan el acuífero, presenta un espesor que varía entre 8 y 70 m, en donde el agua circula en forma de acuífero libre, el cual es explotado principalmente por norias.

La permeabilidad de los sedimentos es baja, como lo demuestra la baja resistividad, asociada a suelos limo-arenosos.

El medio fracturado está constituido principalmente por andesitas, basaltos y por tobas andesíticas y riolíticas, cuyo espesor conjunto alcanza los 400 m. Este medio presenta resistividades por lo general altas y es explotado por pozos profundos.

Es importante señalar que existe una capa profunda intercalada entre el medio fracturado, a una profundidad promedio de 300 m, constituida por una unidad de resistividad baja, asociada con arenas (conglomerado polimíctico o arenisca), que se considera el basamento del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por diferentes métodos analíticos convencionales (Theis, Jacob y Hantush) se determina que los valores de transmisividad oscilan entre 9 y 150 m²/día (1.04×10^{-4} a 1.7×10^{-3} m²/s), sin embargo, si se considera el método numérico alternativo de K. S. Rathod y K. R. Rushton (1991), el cual toma en cuenta condiciones más reales de funcionamiento hidráulico, las transmisividades oscilan entre 28 a 150 m²/día (3.2×10^{-4} a 1.7×10^{-3} m²/s), con un valor promedio de 86 m²/día (1×10^{-3} m²/s).

Por su parte, los valores de conductividad hidráulica obtenidos con este último método se encuentran entre 0.38 y 6.0 m/día (0.0000044 y 0.000069 m/s), mientras que el rendimiento específico presenta valores entre 0.02 y 0.15 lps/m, prevaleciendo valores de 0.1 lps/m.

En cuanto al coeficiente de almacenamiento, a pesar de que ninguna prueba contó con pozo de observación, el método numérico de Rathod y Rushton, permitió obtener valores comprendidos entre 0.00005 y 0.00065, con un valor promedio de 0.0005.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático, mostrada en la figura 3, muestra que los niveles estáticos del acuífero varían, de manera general de 46 a 104 m, con excepción de un valor de 13 m que corresponde al pozo localizado hacia el oriente de la zona de estudio.

Niveles estáticos de 50 a 60 m se registran hacia el norte y sur de la población Lázaro Cárdenas y en las inmediaciones de esta localidad y al noroeste de Toluca de Guadalupe los valores varían de 70 a 100 m. No se observa un control topográfico de la profundidad al nivel del agua subterránea.

Los valores someros (del orden de 5 m), corresponden a norias poco profundas, no son representativos del nivel estático regional.

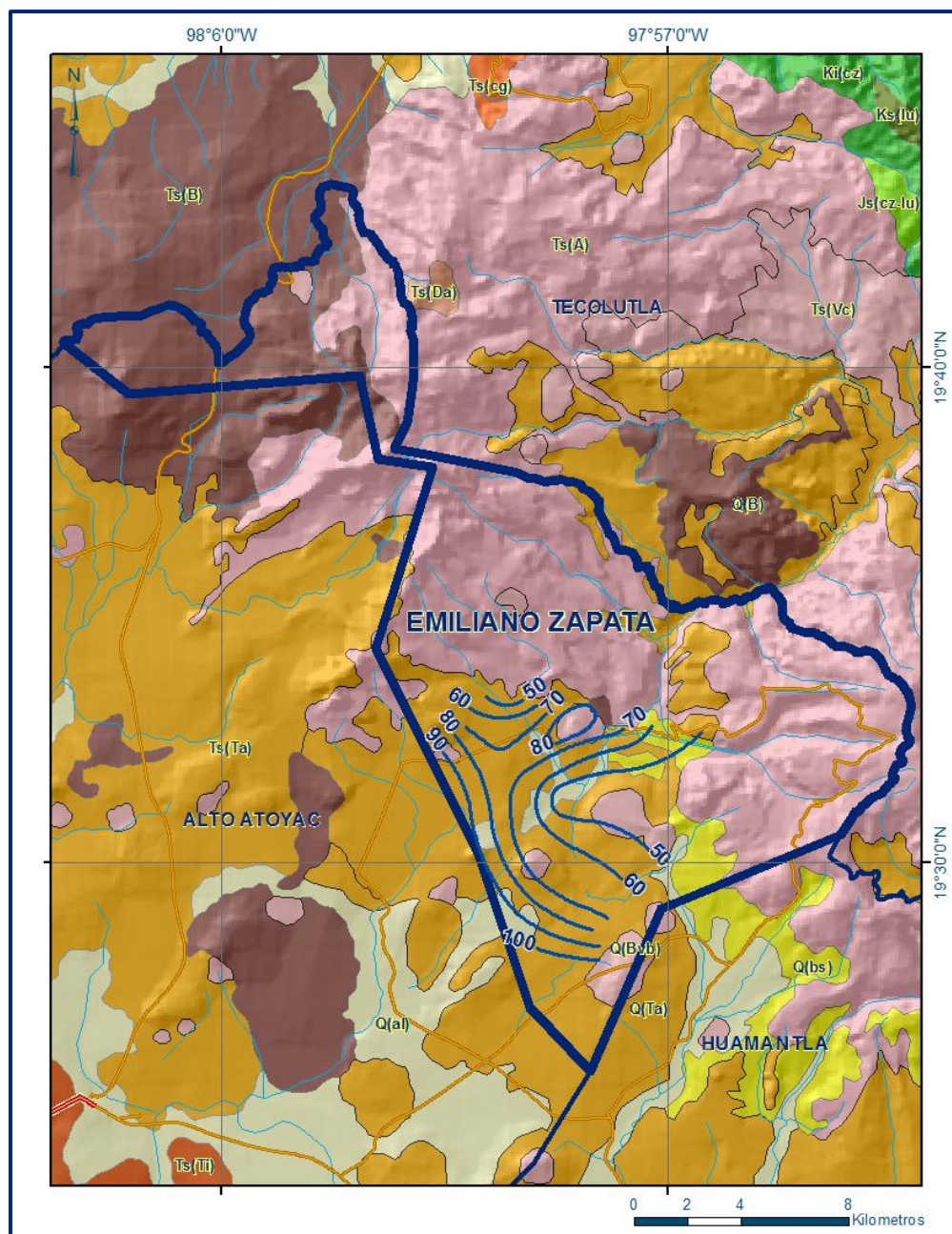


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010).

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático (figura 4), se observa que los valores varían de 2600 a 2440 msnm, de la equipotencial más alta que se localiza hacia las partes topográficamente más altas al oriente del poblado de Lázaro Cárdenas, descendiendo gradualmente por efecto de la topografía hasta los valores más bajos que se registran al oeste de Toluca de Guadalupe.

La dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una trayectoria de norte a sur, con alimentaciones provenientes del flanco oriental.

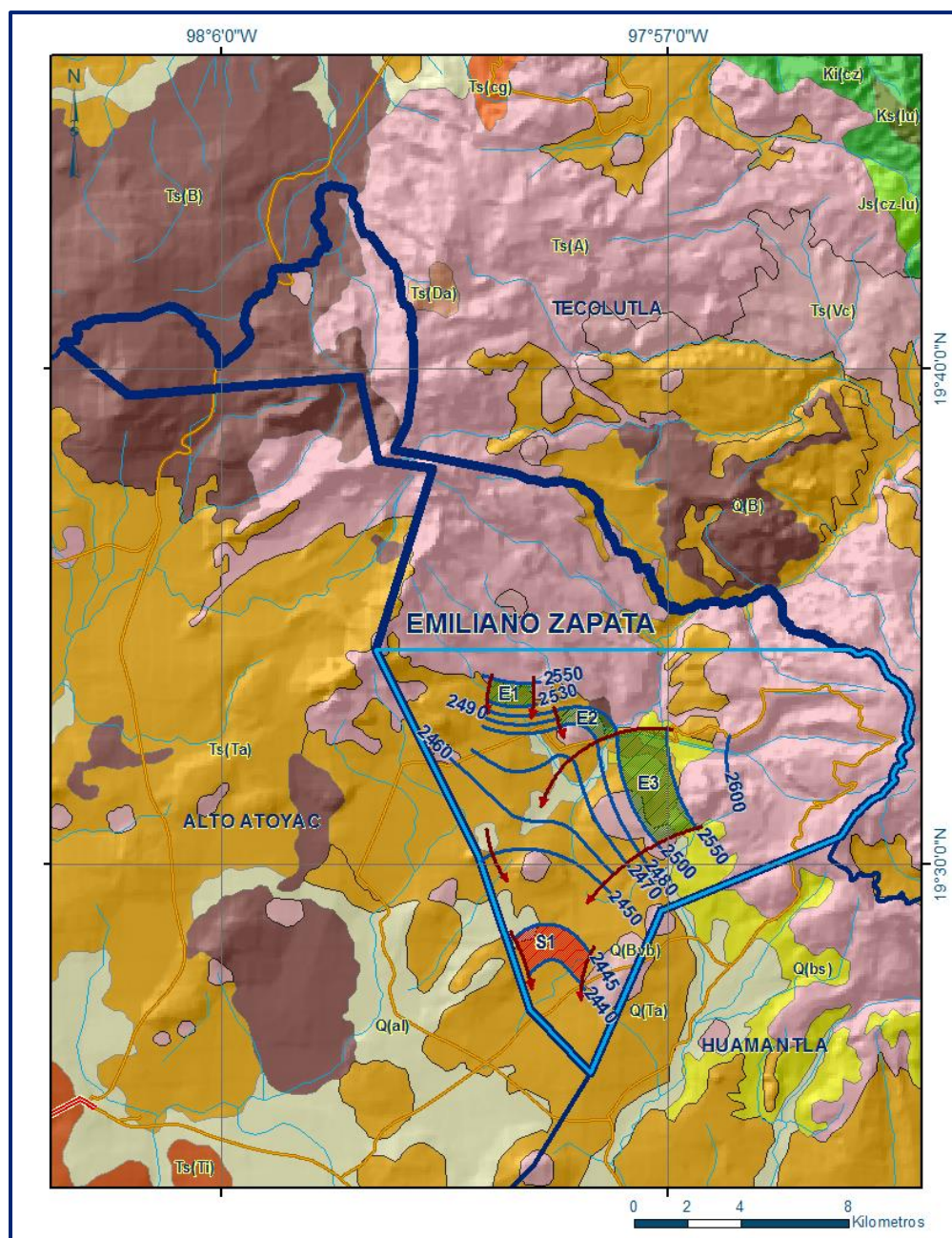


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero, por lo que no es posible realizar una configuración de evolución del nivel estático.

Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo. El volumen de extracción es muy inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 49 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (6 pozos, 2 norias y 41 manantiales), para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 96 a 311 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. de STD para el agua destinada al consumo humano.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad baja (C1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S1), lo que indica que es apta para cualquier tipo de cultivo y de suelos.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada cálcica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas.

Los valores de temperatura varían de 10.8 a 27 °C, de potencial de hidrógeno (pH) oscilan entre 6.0 y 8.09 y los de potencial redox (Eh) entre 200 y 291. Los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 44 y 796 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con promedio de 219.

La dureza registra valores entre de 150.51 y 43.82 mg/lit; en tanto que las concentraciones de sulfatos varían entre 4.33 y 55.74 mg/lit, de cloruros entre 42.10 y 1.94 mg/lit; de nitratos entre 0.33 y 19.17 mg/lit; de magnesio entre 17.15 y 80.02 mg/l y de sodio oscilan entre 0.85 y 100.32 mg/lit.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2010, se registraron un total de 63 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 44 son manantiales, 13 pozos y 6 norias; de ellos 4 se consideran inactivos (3 pozos y una noria). El volumen de extracción estimado asciende a **0.6 hm³/año**, de los cuales 0.4 hm³ (66.7%) se destinan al uso público-urbano y los 0.2 hm³ restantes (33.3%) para uso agrícola.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance se definió en una superficie de 266.5 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

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

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

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

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

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados en riego son muy bajos y no existen poblaciones urbanas importante, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical

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:

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

Donde:

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

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

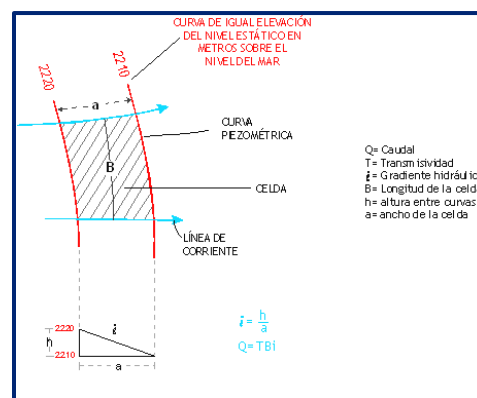
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionaron los canales de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **3.1 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

Celda	Ancho (m)	Largo (m)	h_1-h_2 (m)	Gradiente hidráulico (i)	Transmisividad (m^2/s)	Caudal (m^3/s)	Volumen ($hm^3/año$)
E1	1,568	773	20	0.026	0.0003	0.013	0.4
E2	2,144	637	20	0.031	0.0003	0.022	0.7
E3	4,347	1,960	50	0.026	0.0006	0.063	2.0
Total Entradas							3.1

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterránea se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), manantiales (Dm) y por salidas de flujo subterráneo (Sh). No existe descarga por evapotranspiración (ETR) ni descarga por flujo base (Dfb). El acuífero tiene sus niveles estáticos en general mayores a 10 m de profundidad y de acuerdo con el tipo de suelos y formaciones geológicas, no tiene efecto las salidas de agua subterránea por evapotranspiración, por lo que **ETR = 0**.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **0.6 hm³/año**.

7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

Del aforo de los manantiales ubicados dentro del territorio del acuífero, se estima que su descarga es del orden de 155 lps, que equivalen a **4.9 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas horizontales

Celda	Ancho (m)	Largo (m)	h_1-h_2 (m)	Gradiente hidráulico (i)	Transmisividad (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)
E1	3,161	1,764	5	0.003	0.0017	0.016	0.5
Total Salidas							0.5

El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **0.5 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los escasos registros existentes recabados en los recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero. Por lo tanto, para fines del balance $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (R_v), el cual será calculado a partir de la ecuación (2):

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

$$R_v = 0.6 + 4.9 + 0.5 - 3.1 + 0.0$$

$$R_v = 2.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total (R_t) es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 2.9 + 3.1$$

$$R = 6.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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 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 **6.0 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **4.9 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **761,890 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 6.0 - 4.9 - 0.761890 \\ \text{DMA} &= 0.338110 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **338,110 m³ anuales**.

