

# SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO TAMPAÓN-ZONA DE SIERRA (2211), ESTADO DE QUERÉTARO

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

# Contenido

1.	GENERALIDADES	2
Ant	ecedentes	2
1.1.	Localización	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1.	Provincia fisiográfica	6
3.2.	Clima	7
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología	8
4.	GEOLOGÍA	8
4.1.	Estratigrafía	8
4.2.	Geología estructural	13
4.3.	Geología del subsuelo	14
5.	HIDROGEOLOGÍA	
5.1.	Tipo de acuífero	15
5.2.	Parámetros hidráulicos	15
5.3.	Piezometría	16
	Comportamiento piezométrico	
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	17
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	18
<b>7.</b>	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	
7.1	Entradas	18
7.	1.1 Recarga vertical (Rv)	19
7.	1.2 Recarga inducida	24
7.2	Salidas	24
7.	2.1 Extracción por bombeo (B)	24
7.	2.2 Descarga por manantiales (Dm)	24
8.	DISPONIBILIDAD	25
8.1	Recarga total media anual (R)	
8.2	Descarga natural comprometida (DNC)	
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	26

#### 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 Tampaón-Zona de Sierra, definido con clave 2211 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción nororiental del Estado de Querétaro, entre las coordenadas geográficas 21° 05' y 21° 35' de latitud norte y 99° 20' y 99° 47' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,299 km². Limita al norte y este con el acuífero Huasteca Potosina perteneciente al estado de San Luis Potosí, al sur con el acuífero Tolimán, ubicado en el Estado de Querétaro y al oeste con el acuífero Xichú–Atarjea del Estado de Guanajuato (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca prácticamente en su totalidad el municipio Arroyo Seco, parcialmente los municipios Pinal de Amoles y Jalpan de Serra y sólo una pequeña porción al sureste se localiza en el municipio Peñamiller. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

VERTICE	LONGITUD OESTE				LATITUD NOR	TE	ADOLDIA OLONICO	
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	OBSERV ACIONES	
1	99	45	40.1	21	12	47.2	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL	
2	99	46	36.5	21	29	41.1	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL	
3	99	33	1.1	21	25	38.7		
4	99	29	55.2	21	21	59.0		
5	99	27	59.5	21	20	15.9		
6	99	25	12.4	21	16	52.6		
7	99	27	17.1	21	14	34.2		
8	99	25	12.4	21	12	39.1		
9	99	25	6.8	21	11	35.0		
10	99	22	40.2	21	11	51.6		
11	99	20	45.0	21	11	18.3		
12	99	22	11.3	21	8	15.8		
13	99	25	13.8	21	7	3.4		
14	99	28	14.9	21	7	21.5		
15	99	31	1.8	21	5	49.0		
16	99	33	27.7	21	7	23.9		
17	99	36	35.5	21	8	0.9		
18	99	39	40.9	21	7	1.9		
19	99	41	24.2	21	8	13.0		
20	99	43	31.3	21	8	43.4		
21	99	44	29.4	21	11	26.7		
1	99	45	40.1	21	12	47.2		

#### 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tampaón- Zona de Sierra pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Querétaro. En el territorio completo que cubre el acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del "ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013,

A través de este, en el acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

El acuífero pertenece al Consejo de Cuencas "Río Pánuco", instalado el 26 de agosto de 1999. El principal usuario del agua subterránea es el público-urbano. En el acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, ni se ha constituido hasta 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 algunos estudios de carácter regional, con fines hidrogeológicos, geológicos y geofísicos. A continuación, se describen los principales los principales estudios elaborados en la región:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y EJECUCIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES EN LA ZONA DE JALPAN, LANDA DE MATAMOROS Y ARROYO SECO, EN LA PORCIÓN NORORIENTAL DEL ESTADO DE QUERÉTARO. Elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1981. El objetivo del estudio fue localizar sitios adecuados para la perforación de pozos. El censo de aprovechamientos identificó la existencia de 2 pozos, 10 norias, 13 manantiales y una galería filtrante; entre otras actividades se realizó el muestreo de agua subterránea y la ejecución de ocho sondeos eléctricos verticales (SEV), cuya interpretación identificó tres unidades geoeléctricas: la unidad A corresponde a materiales granulares, la unidad B compuesta de rocas volcánicas y la unidad C asociada a rocas calcáreas; asignando permeabilidad alta a las rocas calcáreas, permeabilidad media al relleno aluvial y permeabilidad baja a las rocas ígneas.

ESTUDIO DE EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE ENCONTRAR AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL POBLADO DE ARROYO SECO, QUERÉTARO. Elaborado por Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A de C.V., para la Comisión Estatal de Aguas en 1994. Realiza sondeos eléctricos verticales y define unidades geoeléctricas. Propone la perforación de un pozo exploratorio.

PROSPECCIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA PERFORACIÓN DE UN POZO ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE A LA COMUNIDAD "EL REFUGIO" MUNICIPIO ARROYO SECO, QUERÉTARO. Elaborado por Servicios en Aguas Subterráneas para la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro en 2002.

Mediante la realización de sondeos eléctricos verticales, define unidades geoeléctricas e identifica la de mayor potencial acuífero. A diferencia del estudio de 1994, propone y realiza la perforación de un pozo.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO EN LA COMUNIDAD "EL REFUGIO", MUNICIPIO DE ARROYO SECO, QUERÉTARO. Elaborado por SEGEOMEX Exploración y Laboratorios S. de R.L. de C.V. en 2010. Incluye una descripción de la geología local y de los lineamientos estructurales que predominan en la zona. Se realizaron sondeos eléctricos verticales y se proponen sitios de perforación.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS TAMPAÓN ZONA DE SIERRA Y MOCTEZUMA. Elaborado por el Instituto Tecnológico Superior de Cosamaloapan para la Comisión Nacional del Agua en 2011. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Este estudio fue la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

#### 3. FISIOGRAFÍA

#### 3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de E. Raisz (1964), el acuífero Tampaón-Zona de Sierra se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, en la Subprovincia Sierras Altas, la cual está formada por un conjunto de sierras menores de estratos plegados de antiguas rocas sedimentarias marinas (de edad Cretácico y Jurásico Superior), entre las que predominan las calizas y en segundo término, areniscas y lutitas. De acuerdo con la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Geografía (INEGI, 1997), el acuífero se ubica en la Discontinuidad denominada Carso Huasteco".

La topografía es abrupta, el relieve montañoso es accidentado y está conformado por grandes sierras alargadas y plegadas con orientación preferente noroeste-sureste, constituidas por rocas calcáreo-arcillosa, separados por valles angostos que generalmente corresponden a sinclinales.

#### 3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Koppen, modificada por E. García (1981), para las condiciones de la República Mexicana, el clima que predomina en la zona del acuífero es el templado subhúmedo (A(C) $w_0(w)$ ), con temperatura media anual entre 18 y 22°C, régimen de lluvia de verano en el que el periodo de máxima precipitación se presenta entre mayo y octubre.

En la porción suroeste se presenta el clima templado subhúmedo ( $C(w_2)$ ) que corresponde al más húmedo de este subtipo, con régimen de lluvia en verano, donde la precipitación del mes más seco es superior a 40 mm y la temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C.

En las zonas aledañas a los ríos Jalpan y Santa María, se presenta el clima cálido subhúmedo Aw<sub>0</sub> (w), con temperatura media anual mayor de 22 °C, es el menos húmedo de los tipos de clima presentes en la superficie que cubre el acuífero.

Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de tres estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero: Jalpan, Ayutla y Pinal de Amoles, las cuales cuentan con un periodo promedio de análisis de 27 años. De acuerdo con los registros de estas estaciones, utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **897.1 mm** y **22 °C**, respectivamente.

#### 3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica RH 26, Río Pánuco, Subregión Hidrológica Alto Pánuco, Cuenca Río Tamuín (26 C), subcuenca del Río Tampaón-Santa Martha-La Laja.

Entre los ríos más caudalosos e importantes de la zona destacan: Jalpan, Santa María, La Florida, Huastequita, La Atarjea, Concá y San Isidro, así como algunos arroyos importantes como El Guayabito y Arroyo Grande. La hidrografía de la zona presenta un drenaje variado, principalmente de tipo dendrítico y en menor proporción paralelo y rectangular. Dentro de los límites del acuífero, en los alrededores de la comunidad Jalpan, se localiza la Presa Jalpan para el control de avenidas del río del mismo nombre, que nace en el macizo montañoso de Pinal de Amoles, el cual a su vez es afluente del Río Santa María.

Existe también un gran número de manantiales que aportan un caudal importante a las corrientes superficiales, de estos destacan por su volumen los que se localizan en la comunidad Concá y el del Hotel Exhacienda Concá, cuyo caudal conjunto es de 400 lps.

#### 3.4. Geomorfología

Las geoformas están controladas principalmente por rocas calcáreas y arcillosas, las primeras dan origen a relieves fuertes con drenaje paralelo, ocupan las partes topográficas más altas; las rocas arcillosas originan relieves suaves con drenaje de tipo dendrítico a subdendrítico, formando bajos topográficos, los conglomerados forman lomeríos redondeados y las rocas volcánicas pequeñas mesetas.

Las características geomorfológicas presentes en el área evidencian los diferentes eventos geológicos que modelaron el paisaje característico de la región. El proceso geológico más evidente está representado por la Orogenia Laramide, causado por esfuerzos tectónicos compresivos y distensivos que dieron lugar a la formación de un paisaje accidentado, que se caracteriza por su relieve y pendientes, con altitudes que varían desde 500 msnm, en las márgenes de los ríos Concá y Santa María, a elevaciones como el Cerro Santo Domingo con 2000 msnm, al igual que el Puerto del Diablo o los cerros El Derramadero y El Madroño, con 2500 y 2600 msnm respectivamente. Al oeste del poblado Los Pinos se ubica el cerro El Águila con una altitud de 2600 msnm, mientras que al suroeste de la misma comunidad se localiza el Cerro La Calentura cuya elevación alcanza 3060 msnm.

Debido al relieve escarpado en la zona serrana, geomorfológicamente, se considera que esta zona se encuentra en una etapa de juventud tardía, con topografía abrupta y cañones profundos.

#### 4. GEOLOGÍA

La geología de la zona está representada por rocas sedimentarias que afloran en la sierra, mientras que en los valles ubicados en el centro y norte del acuífero se han depositado aluviones de escaso espesor (figura 2).

# 4.1. Estratigrafía

En la superficie del acuífero afloran rocas sedimentarias y volcánicas cuyo rango estratigráfico varía del Jurásico Superior al Reciente. La descripción de las diferentes unidades litológicas se presenta a continuación, de la más antigua a la más reciente:

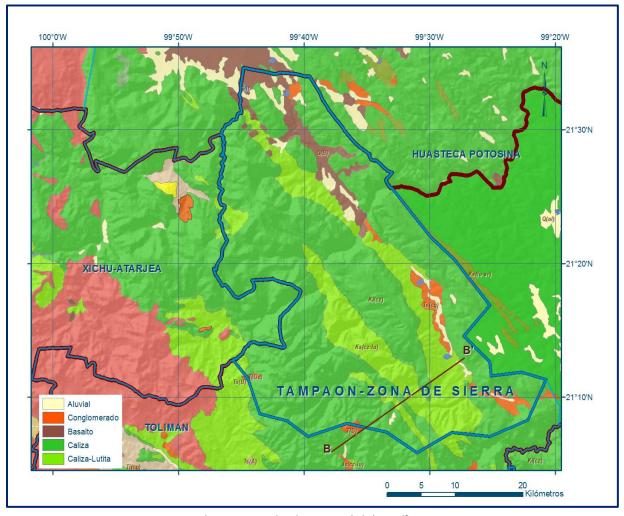


Figura 2. Geología general del acuífero

# JURÁSICO SUPERIOR Formación Las Trancas

Está constituida de calizas, calizas arcillosas y filitas, dispuestas en capas muy delgadas con superficies brillantes lustrosas, colores variables del negro al blanco, pasando por todos los grises, que contienen abundantes plagioclasas con reflejos rosados. Aflora en una serie de franjas con dirección preferente noroeste-sureste. Contiene intercalaciones de lutitas y limonitas que alternan con capas delgadas de caliza. Hacia la cima se observa disminución de los estratos de lutitas que se adelgazan (menores a 5 cm) y las capas carbonatadas incrementan su espesor, hasta 20 a 30 cm.

# Formación Santiago

Descrita como una secuencia de calizas débilmente arcillosas, de color obscuro, intercaladas con lutitas, filitas y pizarras que tiene un espesor estimado de 160 m.

Aflora principalmente en la porción suroeste del acuífero, en las cercanías de la localidad Huazquilico.

#### Formación Pimienta

Está compuesta por material calcáreo de estratificación delgada cuyas capas varían de 10 a 70 cm de espesor con intercalaciones de lutitas de color obscuro. Se estima un espesor máximo de 350 m y aflora en la porción suroccidental de la zona de estudio, cerca del poblado de Rincón de Pitzquintla. Subyace transicional y concordantemente a la Formación Tamaulipas Inferior y se correlaciona con las formaciones La Caja, La Casita y parte de Las Trancas.

#### **CRETÁCICO**

# Formación Tamaulipas Inferior

Está compuesta principalmente por calizas con microfósiles, ligeramente arcillosa y en capas que varían de 15 a 60 cm de espesor. Descansa concordantemente con la Formación Pimienta y se le asigna un espesor máximo de 300 m; aflora en la porción sur y central del acuífero, en las proximidades de la ranchería Acoyotla,

#### Formación El Abra

Está representada por calizas con peletoides, miliólidos y restos biógenos indeterminados, presenta además dolomías de color gris claro. Se le estima un espesor de 1500 m y se correlaciona con las formaciones Tamabra, Cuesta del Cura y Tamaulipas Superior. En varios trabajos geológicos a detalle a esta unidad se le considera como Formación El Doctor.

#### Formación El Doctor

Es la unidad con mayor distribución en el acuífero, está representada por calizas con estructuras y texturas variadas, formadas en diferentes ambientes de depósito como plataformas carbonatadas representadas por el banco calcáreo El Doctor que se localiza al suroeste del área y representado por las facies Ladrón y Socavón, y la plataforma de la cuenca Valles-San Luis Potosí, ubicada al noroeste del área, representada por las facies San Joaquín y La Negra.

Esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Las Trancas, se distribuye en una serie de franjas orientadas preferentemente al noroeste. En la porción suroriental del acuífero se observan bancos de calizas relacionadas con un arrecife de crecimiento vertical, en el cual se han distinguido cuatro facies:

- i) Cerro Ladrón: masa lenticular de caliza constituida por lodos calizos litificados de estratificación gruesa,
- ii) *Socavón*: calcarenitas de estratificación gruesa y conglomerado de grano fino, con abundante presencia de coquina clástica,
- iii) *San Joaquín*: es una caliza gris obscura de estratificación gruesa con abundantes nódulos de pedernal negro, i
- v) *La Negra:* estratos de caliza de 10 a 20 cm de espesor, depositada en aguas más profundas, correlacionable con la Formación Cuesta del Cura del Noroeste de México.

# Formación Tamasopo

Constituida por calizas con microfósiles, de color gris claro, estratificación media (0.80 m), con vetillas de calcita que no presentan direcciones preferenciales. Su espesor es variable, se considera de 300 a 400 m.

Descansa concordantemente sobre la Formación El Abra y subyace de igual forma con la Formación Cárdenas. Es correlacionable con las Formaciones San Felipe y parte de la Formación Soyatal.

# Formación Soyatal

La representan calizas de estratificación delgada distribuidas en gran parte del acuífero, intercaladas con lutitas laminares y margas de color amarillo; en algunas localidades se encuentra formada por bancos masivos de color gris claro. Se le asigna un espesor de 300 m y descansa concordantemente sobre las Formaciones Cuesta del Cura e infrayace de igual manera a la Formación Soyatal-Mexcala.

# Formación San Felipe

Secuencia de calizas arcillosas de color obscuro, estratificación delgada y abundante presencia de microfósiles, intercaladas con lutitas, cuyo espesor aproximado es de 100 m. Es correlacionable con la Formación Tamasopo y aflora principalmente al suroeste del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Saltillo y El Barco.

# Formación Soyatal-Mexcala

Secuencia de lutitas de color amarillo a café rojizo, intercaladas con areniscas compactas de grano fino a medio con vetillas irregulares de hematita, cuarzo y calcita, cuyo espesor se estima en 1000 m. Sobreyace en forma concordante a la Formación Soyatal, mientras que su porción superior se encuentra cubierta por material reciente o erosionado.

Está expuesta en la porción suroriental del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Jalpan de Serra, Capulines, Barreales, La Joya, Santa María de Los Cocos y Panales. Constituye el núcleo del sinclinal que se extiende en la ranchería Ocotitlán con rumbo norte 35° oeste, limitado al occidente por una falla inversa sensiblemente paralela al plegamiento.

#### Formación Cárdenas

Está formada por lutitas de color café, intercalas con areniscas compactas de estratificación delgada, cuyo espesor se estima en 1000 m. Cubre concordantemente a sedimentos de la unidad Tamasopo (Miembro Superior) e infrayace en forma discordante a depósitos recientes y a derrames ígneos. Representa un depósito de tipo regresivo y los sedimentos que la constituyen son de aguas poco profundas de alta energía. Se localiza en la porción central y noroeste de la zona, en las inmediaciones de los poblados El Aguacate, El Naranjito y La Morita.

#### **TERCIARIO**

# Rocas Ígneas Intrusivas

Están presentadas por rocas de composición granodiorítica a diorítica, cuyas edades varían entre 62.2 y 4.5 Ma., en forma de stocks alineados sensiblemente al noroeste e interrumpidas al oriente por el paquete volcánico de la Sierra Gorda, que en conjunto dan origen a un batolito sepultado de grandes dimensiones.

Las granodioritas presentan contenidos similares de plagioclasas sódicas y ortoclasa, textura equigranular, de color gris crema con tonalidades rojizas debido a procesos de oxidación. Intrusionan a rocas carbonatadas del Cretácico Medio, originando yacimientos con mineralización de plomo-zinc, emplazada en cuerpos tipo skarn. Las dioritas presentan color gris verdoso, de textura holocristalina equigranular en la que predomina la plagioclasa sódica, los minerales accesorios consisten principalmente de horblenda y en menor proporción biotita. La unidad presenta una morfología lomeríos redondeados que presentan fuerte oxidación.

# **Roas Ígneas Extrusivas**

Representadas principalmente por basaltos de la Formación Tlachinol y en menor proporción riolitas y andesitas. La Formación Tlachinol está conformada por derrames basálticos que afloran en la región norte del acuífero, específicamente en las cercanías de Arroyo Seco y Ayutla; presentan color obscuro, textura afanítica, compacta en su mayor parte, con fuerte oxidación de hierro. Su espesor aproximado es de 450 m.

#### RECIENTE

Está representado por conglomerados polimícticos de pie de monte, aluviones y suelo residual. El conglomerado está constituido por fragmentos de caliza provenientes del banco calcáreo El Doctor y en menor proporción por lutitas de la Formación Soyatal-Mexcala. Los aluviones están formados por gravas, arenas y limos producto de la erosión de las rocas que afloran en la superficie del acuífero. El suelo residual proviene de la alteración meteórica de los diferentes tipos de roca. Se encuentra rellenando las partes topográficamente más bajas, el espesor de esta unidad es inferior a 50 m.

# 4.2. Geología estructural

El área de estudio fue afectada por el evento tectónico compresivo que dio origen a la Sierra Madre Oriental a fines del Cretácico y principios del Terciario.

La zona presenta una serie de plegamientos anticlinales y sinclinales recostados de orientación noroeste-sureste, con vergencia predominante al noreste, así como cabalgaduras de ángulo bajo.

El fallamiento y fracturamiento está presente en dos sistemas principales, uno de orientación noroeste-sureste, que es el predominante; el otro presenta orientación noreste-suroeste; existen también fracturas de rumbo norte-sur y en menor proporción este-oeste.

Todas las estructuras plicativas, están orientadas en dirección noroeste-sureste, con vergencia al noreste; se presentan en pliegues generalmente recostados, isoclinales, de charnelas redondeadas, de dimensiones importantes que llegan a aflorar con ejes de varios cientos de kilómetros, característicos de la Sierra Madre Oriental.

Los núcleos de los anticlinorios están constituidos por las rocas terrígenas de la Formación Las Trancas, mientras que en los núcleos de los sinclinorios afloran rocas de la Formación Soyatal-Mexcala.

En muchos de los flancos de estas estructuras se observan contactos tectónicos, interpretados como cabalgaduras, que ponen en contacto indistintamente a las rocas más antiguas (Formación Las Trancas), sobre rocas más recientes (Formación El Doctor) o la Formación El Doctor sobre la Formación Soyatal-Mexcala, se ha observado también sobrecorrimiento de la Formación El Doctor, sobre las rocas terrígenas de la Formación Las Trancas.

La vergencia de las cabalgaduras es similar y/o paralela a los ejes de los pliegues, por lo que se interpretan como producto de un mismo evento de deformación compresiva, probablemente relacionada a la Orogenia Laramide. De poniente a oriente las principales estructuras son: cabalgadura Cerro de la Media Luna; anticlinorio El Piñón dentro del cual se localizan el sinclinal Epazotes Grandes y el anticlinal Pinal de Amoles, sinclinal El Aguacate, anticlinal Bonanza, cabalgadura El Fraile; a partir de esta estructura empieza la Plataforma Valles-San Luís Potosí, le sigue el sinclinal Ahuacatlan, anticlinal, anticlinal El Fraile, la cabalgadura Puente de Dios, sinclinal Jalpan, anticlinal Táncama y el sinclinal Sabino Grande. Al sureste de la zona del acuífero se observa la cabalgadura Jiliapan, que pone en contacto a la Formación El Abra sobre la Formación Soyatal-Mexcala. (Carta Geológica-Minera F14-C48 "Jalpan" Esc. 1:50,000; SGM, 1998).

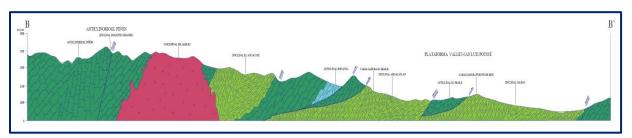
# 4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica, así como la geología superficial recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible establecer que el acuífero se encuenta constituido, en la zona de valles, por sedimentos aluviales de granulometría variable, desde gravas hasta arcillas, que conforman el cauce del rio Jalpan.

Otros ríos y arroyos intermontanos, así como los conglomerados polimícticos, que han sido transportados por los escurrimientos superficiales desde las regiones topográficamente más altas de la región. Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región.

A mayor profundidad se encuentran las calizas de las formaciones Soyatal-Mexcala y El Doctor, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución; debido a que están alternadas con lutitas y limolitas, presentan condiciones de confinamiento. Este acuífero aún no sido explorado. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y disolución. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de lutitas y limonitas que alternan con capas delgadas de caliza y marga de la Formación Las Trancas y por las rocas intrusivas (figura 3).

El sistema acuífero está controlado por un conjunto de cavidades de tipo kárstico, así como por unidades calcáreas de plataforma, regidos por las complejas características estructurales, como la deformación dúctil y frágil presentes en la zona de estudio, que ocasionan la presencia de fracturas abiertas de gran tamaño en la Formación El Doctor, mientras que en la Formación Las Trancas las fracturas tienden a presentar rellenos producto de mineralización.



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-C48 "Jalpan" Esc. 1:50,000 (SGM, 1998) Figura 3. Sección geológica esquemática

#### 5. HIDROGEOLOGÍA

# 5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada de extensión y espesor reducido, así como por conglomerados, cuya presencia se restringe a los pequeños valles aluviales y al cauce de ríos y arroyos; la unidad inferior está conformada por calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

El sistema acuífero alojado en las calizas de la Formación El Doctor presenta gran desarrollo de carsticidad asociado a un sistema de fracturas cuyo contenido de arcillas varía de moderado a alto, dando origen a la presencia de una gran cantidad de manantiales.

# 5.2. Parámetros hidráulicos

En el área que cubre el acuífero no se han realizado pruebas de bombeo para la determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero, debido principalmente al escaso número y a las características de los aprovechamientos, la gran mayoría de ellos son manantiales.

Sin embargo, de acuerdo con datos de campo obtenidos durante el estudio de 2011, la abundancia de materiales arcillosos intercalados con unidades calcáreas, permitió asignar una transmisividad media de 0.00376 m²/s (325 m²/día), con valores mínimos de 0.00347 m²/s (300 m²/día) representativos de la zona centro norte y extremo norte del acuífero, y valores máximos de 0.00405 m²/s (350 m²/día) representativos de la zona sureste del acuífero.

Por otro lado, se estiman valores de conductividad hidráulica que oscilan entre **0.00116 y 0.00231 m/s (100 y 200 m/día**), que están asociados a la presencia de materiales finos.

El coeficiente de almacenamiento para estos materiales en las zonas más carstificadas de la Formación El Doctor se estima que es de **0.02**, mientras que en las facies carbonatadas que generan manantiales en el contacto con la Formación Las Trancas se estima un valor de **0.0005**.

#### 5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2011. Además, las escasas mediciones piezométricas recabadas durante los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y la gran mayoría de los aprovechamientos censados son manantiales, que impiden realizar las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático.

#### 5.4. Comportamiento piezométrico

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático debido a que la gran mayoría de los aprovechamientos son manantiales.

Además, debido a las condiciones orográficas del acuífero, existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae de manera incipiente el agua subterránea de los niveles freáticos someros.

Debido al escaso número de aprovechamientos subterráneos existentes en el área que cubre el acuífero y al incipiente volumen de extracción, 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.

# 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En 2011 se tomaron muestras en 15 aprovechamientos, de los cuales 10 fueron manantiales, dos norias, un pozo y dos aprovechamientos superficiales.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, coliformes fecales y totales, etc., además de metales como aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio y plomo, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

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

El valor máximo de concentración de sólidos totales disueltos registrado fue de 493 mg/l; la conductividad varía entre 337 y 1005 µs/cm; el pH varía de 6.9 a 8.4, los valores más altos se registraron en las muestras de agua superficial; sólo dos muestras excedieron el limite permisible de nitratos: las muestras tomadas en la Cascada Chuvejé (43 mg/l) y en una noria de la comunidad Jalpan (17 mg/l).

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante la familia de agua predominante es la bicarbonatada-cálcica, con componentes secundarios como sodio y magnesio; que representa agua de reciente infiltración, de tiempos de residencia muy cortos, que ha circulado a través de rocas carbonatadas.

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  $C_2$ - $S_2$ , que representa salinidad media y contenido medio de sodio intercambiable, considerada de buena calidad y apta para el riego en la mayoría de los casos y sin necesidad de prácticas de control de salinidad. Un número menor de muestras se clasifica como  $C_3$ - $S_1$  (salinidad alta y contenido medio de sodio intercambiable), que sólo se puede utilizar en cultivos tolerantes a las sales y/o en suelos con buen drenaje

#### 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En 2011 fueron censados 15 aprovechamientos, 2 pozos, 3 norias y 10 manantiales. Del total, 14 están activos y uno (pozo) inactivo. Del total de obras, 2 (manantiales) se utilizan en la agricultura, 3 (2 pozos y 1 noria) para uso público-urbano y 10 para usos doméstico y pecuario (2 norias y 8 manantiales). El volumen de extracción total es de **0.2 hm³ anuales**, que se destina totalmente al uso público-urbano.

Adicionalmente, a través de **manantiales**, se descarga un caudal de 430 lps que representan un volumen de **13.6 hm³/año**, destinados en su totalidad a los usos doméstico y pecuario, de los cuales 250 lps corresponden al manantial ubicado en la comunidad Concá, 150 lps al manantial localizado en la Exhacienda de Concá y 30 lps que emanan de manantiales de gastos menores ubicados en zonas serranas.

#### 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 la siguiente:

# Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

# Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

#### 7.1 Entradas

Las entradas al acuífero Moctezuma están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la Iluvia (Rv).

No existe información piezométrica actual ni histórica que cubra la zona del acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo hechos se encuentra dispersa en tiempo y espacio, de tal manera que no es posible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

Aunado a esto, existen pocos aprovechamientos del agua subterránea y la superficie del acuífero está conformada en su mayor parte por sierras entre las cuales existen pequeños valles intermontanos en los que se localizan los escasos aprovechamientos.

Por estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie de **1,299 km²** del acuífero, para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

# 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF}$$
 (1)

Donde:

**V**<sub>LL</sub>: Volumen de lluvia;

**V**ETR: Volumen evapotranspirado;

V<sub>ESC</sub>: Volumen escurrido; V<sub>INF</sub>: Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$VI_{NF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}$$
 (2)

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (1,299 km²) por la lámina de precipitación media anual (897.1 mm):

$$V_{LL}$$
 = 1,299 km<sup>2</sup> (0.8971 m) = 1,165.3 hm<sup>3</sup> anuales

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor medio anual de precipitación de 897.1 mm y temperatura de 22 °C.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, define la siguiente expresión para la estimación de la evapotranspiración real:

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. En caso contrario se obtiene una ETR > P y para este caso se debe considerar a ETR = P. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de 780.5 mm anuales.

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

$$T(^{\circ}C) = 22$$

$$P(mm) = 897.1 \quad P^2 = 804788.41$$

$$L = 1382.4 \quad L^2 = 1911029.76$$

$$ETR(mm) \qquad 780.5$$

Por lo tanto, el volumen de ETR es:  $V_{ETR}$  = 1,299 km<sup>2</sup> (0.7805 m) = 1,013.9 hm<sup>3</sup> anuales.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

VOLUMEN ANUAL DE PRECIPITACION = ANUAL DE LA CUENCA \* AREA DE LA COEFICIENTE DE CUENCA \* \* \* \*\*

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

HOO DE QUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO		
USO DE SUELO	Α	В	С		
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3		
Cultivos:					
En hilera:	0.24	0.27	0.3		
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3		
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3		
Pastizal:					
% del suelo cubierto o pastoreo					
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28		
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3		
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3		
Bosque:					
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24		
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26		
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28		
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3		
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32		
Caminos	0.27	0.3	0.33		
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3		
TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS				
А	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos				
В	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos				
С	C Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes mu delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas				

En el caso de que, en la cuenca en estudio, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si *K* resulta menor o igual que 0.15 Si *K* es mayor que 0.15 1.5;

$$Ce = K (P-250) / 2000;$$
  
 $Ce = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) /$ 

#### Donde:

P: Precipitación anual;

Ce: Coeficiente de escurrimiento anual;

K: Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1, 000,000 en la zona que comprende el Acuífero Tampaón Zona de Sierra predominan los siguientes tipos de suelo: Cambisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Rendzina y Vertisol (figura 4).

En cuanto al uso de suelo (figura 5), de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1,000,000, el 48% de la superficie del acuífero está cubierta por bosque, en la que el suelo es tipo B, por lo que K=0.16; 27 % del acuífero presenta selva, suelo tipo B, por lo que K=0.22; el área agrícola se presenta en 17% de la superficie del acuífero, suelo tipo A, por lo que K=0.24; el pastizal cubriendo el 6% del acuífero, con una K=.14; el área urbana con 0.2% de la superficie del acuífero, en donde el suelo es tipo A, y por lo tanto K=0.26.

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.191, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

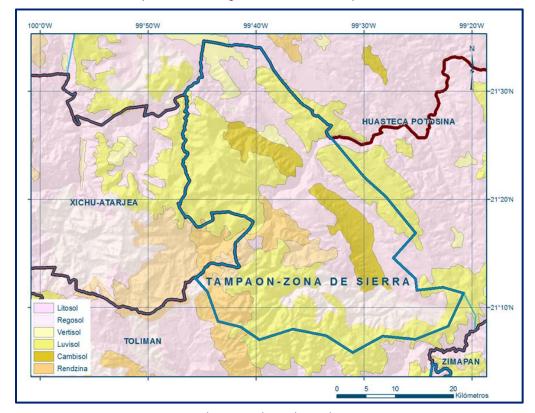


Figura 4. Tipos de suelo

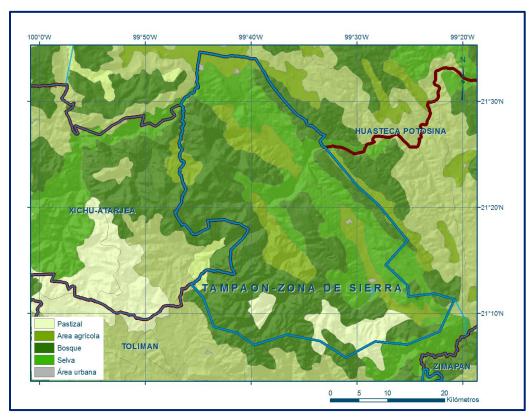


Figura 5. Uso de suelo

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento: **V**<sub>ESC</sub> = 0.0887 (**1,165.3 hm³**) = **103.4 hm³ anuales**. Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}$$
 $V_{INF} = 1,165.3 - 1,013.9 - 103.4$ 
 $V_{INF} = 48.0 \text{ hm}^3/\text{año}$ 

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 1,165.3 hm<sup>3</sup>/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.04

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 48.0 hm³/año en los 1,299 km² de superficie del acuífero. Por lo que la **Rv = 48.0 hm³/año**.

# 7.1.2 Recarga inducida

La recarga inducida o retorno de riego se determinó en función del volumen de agua para uso agrícola, de manera general un 20% de este volumen retorna al sistema acuífero en forma de recarga inducida.

Para la agricultura se utiliza un volumen de agua superficial, proveniente de la Presa Jalpan, de 5.1 hm³/año. De lo anterior se consideró una recarga inducida de **1.0** hm³/año.

#### 7.2 Salidas

#### 7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **0.2 hm³anuales.** 

# 7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la existencia de 10 manantiales, que en conjunto descargan un caudal de 430 lps, que representan un volumen de **13.6 hm³ anuales**.

#### 8. DISPONIBILIDAD

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

DISPONIBILIDAD	=	RECARGA	-	DESCARGA	-	EXTRACCIÓN DE
MEDIA ANUAL DE		TOTAL		NATURAL		AGUAS
AGUA DEL SUBSUELO		MEDIA	(	COMPROMETIDA		SUBTERRÁNEAS
EN UN ACUÍFERO		ANUAL				

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 49.0 hm³/año.

#### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, su valor es de. **DNC = 13.6 hm³ anuales.** 

# 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 **2,939,338 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.

DMA = R - DNC - VEAS DMA = 49.0 - 13.6 - 2.939338 DMA = 32.460662 hm<sup>3</sup>/año.

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **32,460,662 m³ anuales.**