



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE TEQUISQUIAPAN (2205),
ESTADO DE QUERÉTARO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. FISIOGRAFÍA	5
2.1 Provincia fisiográfica	5
2.2 Clima	5
2.3 Hidrografía.....	6
2.4 Geomorfología	6
3. GEOLOGIA.....	8
3.1 Estratigrafía.....	8
4. HIDROGEOLOGIA	16
4.1 Piezometría.....	16
4.2 Comportamiento hidráulico	16
4.2.1 Profundidad al nivel estático.....	16
4.2.2 Elevación del nivel estático.....	17
4.2.3 Evolución del nivel estático	17
4.3 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	17
5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS.....	20
6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANÉAS.....	21
7. DISPONIBILIDAD	25
7.1 Recarga total media anual (R)	25
7.2 Descarga natural comprometida (DNC)	25
7.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	26
7.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	26
8. BIBLIOGRAFÍA	27

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 Valle de Tequisquiapan, definido con la clave 2205 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Querétaro, entre las coordenadas geográficas 20° 50' y 20° 26' de latitud norte y 99° 48' y 100° 07' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 757 km². Limita al suroeste con el acuífero Valle de San Juan del Río, al noroeste con Valle de Amazcala, al norte con Tolimán y al este con Valle de Cadereyta, todos estos pertenecientes al estado de Querétaro; y al sureste con Huichapan-Tecoautla, perteneciente al estado de Hidalgo (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Los municipios que se encuentran dentro de la zona geohidrológica de Tequisquiapan son: Tequisquiapan, Ezequiel Montes y Colón, dentro de las poblaciones se localizan las cabeceras municipales de estos municipios, así como San Martín, Bernal, Ajuchitlán, Santa Rosa de Lima, Villa Progreso, Santillán, Fuentezuelas, San Nicolás entre otros.

La población más importante es Tequisquiapan ya que es un centro turístico artesanal del estado aunado a la población de Bernal por su conocida Peña de Bernal.

El municipio de Ezequiel Montes es donde se ubica una parte importante del desarrollo ganadero de la región. 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 2205 VALLE DE TEQUISQUIAPAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	48	20.7	20	32	39.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	51	28.7	20	27	32.6	
3	99	55	22.0	20	26	11.2	
4	99	58	12.3	20	27	44.8	
5	99	58	46.3	20	30	44.5	
6	100	0	24.1	20	33	22.7	
7	99	59	49.6	20	35	46.6	
8	100	2	43.7	20	38	11.6	
9	100	5	42.9	20	42	55.5	
10	100	6	57.1	20	43	50.9	
11	100	6	31.1	20	46	30.0	
12	100	1	28.7	20	49	40.5	
13	99	57	58.1	20	45	46.4	
14	99	56	11.0	20	46	0.8	
15	99	55	41.4	20	45	1.0	
16	99	52	41.3	20	44	45.6	
17	99	52	13.7	20	43	28.5	
18	99	49	50.2	20	42	40.8	
19	99	50	4.0	20	41	11.0	
20	99	48	5.2	20	37	26.3	
21	99	49	23.6	20	35	27.3	
1	99	48	20.7	20	32	39.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

Se tiene historia de que en el estado de Querétaro las zonas restringidas para el aprovechamiento de las aguas subterráneas han sido un factor preocupante para el control de la sobreexplotación a la capacidad de explotación de los acuíferos y abatimiento de los niveles estáticos en perjuicio de los aprovechamientos constantes cuya conservación y potencia es de interés público. A partir del año de 1949 se cuenta con Decretos Presidenciales publicados en el Diario Oficial de la Federación donde se estableció veda por tiempo indefinido para alumbramiento de aguas del subsuelo en los diferentes valles del Estado de Querétaro.

Mediante el Decreto Presidencial de fecha 18 de octubre de 1950, 2 de febrero de 1956, 13 de noviembre 1960, 17 de Marzo de 1964, 24 de Septiembre de 1964 y 30 de Diciembre de 1975, se estableció veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el valle de Tequisquiapan, que comprende los municipios de Colón, Ezequiel Montes y Tequisquiapan.

Actualmente las restricciones están sustentadas en el control de las condiciones geohidrológicas del acuífero, como su situación geológica estructural, volúmenes de extracción y cálculos de recuperación como base del balance hidráulico del acuífero.

Respecto al Decreto de reserva y reglamento del acuífero no existen antecedentes de alguna publicación en el Diario Oficial de la Federación, existe una propuesta a través del Consejo de Cuenca del Río San Juan del cual forma parte esta zona geohidrológica para llevar a cabo la reglamentación de los acuíferos ubicados dentro de la cuenca.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

2. FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

La zona geohidrológica de Tequisquiapan se emplaza dentro de la provincia fisiográfica del eje Neovolcánico en su transición con la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, se caracteriza por estar constituida por rocas volcánicas del terciario y cuaternario de diversos tipos y texturas que forman en conjunto un extenso y grueso paquete superpuesto a las rocas del mesozoico que caracterizan al dominio de la Sierra Madre Oriental.

El relieve estructural original de esta provincia está estrechamente relacionado con la intensa actividad volcánica iniciada desde el Terciario temprano hasta el Cuaternario. El conjunto de estructuras volcánicas características del paisaje de Querétaro se conformó sobre paleorelieve constituido por las rocas sedimentarias del Mesozoico.

2.2 Clima

El clima de acuerdo con los criterios de Köppen modificados por Enriqueta García, se clasifica en general como semiseco, semicálido, el régimen de lluvia es de verano con una precipitación promedio de 450 a 550 mm siendo hacia su porción Noroeste donde se presentan las menores precipitaciones.

La temperatura media anual esta entre 12 y 18° C; la evaporación potencial media en el valle es del orden de 1.98 cm valores que sobrepasan por mucho a la precipitación pluvial.

2.3 Hidrografía

La zona geohidrológica de Tequisquiapan se ubica dentro de la región hidrológica No 26 perteneciente al Pánuco, cuenca del Río San Juan, no existe una red de drenaje superficial, los principales afluentes de esta cuenca se encuentran hacia el sur; siendo su principal colector el Río San Juan que recibe este nombre después de la unión de los ríos Arroyo Zarco con el Río Prieto, así como los ríos Galindo y la H. Hacia el margen izquierdo del colector principal, atraviesa en su porción sur el acuífero de Tequisquiapan con una dirección Suroeste-Noroeste.

De acuerdo al análisis anual en la cuenca hasta la estación Paso de Tabla se encuentra difícil para satisfacer las demandas que sin embargo a nivel mensual se observa que no ocurre así durante todo el año ya que en los meses de junio a septiembre se satisfacen las demandas.

2.4 Geomorfología

Para describir las expresiones morfológicas que presentan las estructuras geológicas se optó por agrupar las diferentes unidades en serranías y valles que a continuación se describen:

Sierra de Colón

Se localiza al norte del área: presenta una altitud promedio de 2200 msnm con una orientación E-W, la cual delimita la parte meridional de la Mesa Central. La sierra está compuesta por rocas volcánicas ácidas (ignimbritas y Tobas), las cuales forman lomeríos abruptos con escarpes muy pronunciados y en algunos casos pequeñas mesetas además de cerros redondeados con pendientes suaves.

Sierra de Enmedio

Esta sierra se localiza en la parte central de la zona, presenta una alineación NW-SE con una longitud promedio de 40 km.

Está constituida por rocas volcánicas ácidas y básicas principalmente por ignimbritas, tobas y basaltos. En conjunto forman lomeríos con pendientes moderadas a abruptas, con una altitud promedio de 2100 msnm, así como lomeríos de mediana altura que varían entre 100 y 200 m, con escarpes de aproximadamente 30 m, topografía característica de las rocas volcánicas ácidas.

Las rocas básicas forman mesetas de poca extensión y pendientes suaves, localizándose en los extremos occidental y oriental de la sierra.

De igual forma se observa a estas mesetas intercaladas con material consolidado a semiconsolidado que se extienden con pendientes muy suaves hacia los valles aledaños.

La Sierra de Tequisquiapan se localiza al oriente de la zona de estudio con una extensión de aproximadamente 25 km y una orientación NE-SW. Se caracteriza por presentar dos áreas que varían en composición y altitud.

El área norte presenta una topografía de lomeríos de poca altura con pendientes suaves y amplios valles colmados por depósitos de composición ácida básica (ignimbritas, brechas, tobas y basaltos).

Como caso particular se menciona la sierra de laderas tendidas con pendientes moderadas en el poblado de la Higuera y sus alrededores con altitud promedio de 2000 msnm. Hacia el sur de esta Sierra, la composición varía a rocas volcánicas intermedias (andesitas), presentando una sierra de ladera tendidas con pendientes muy abruptas y una gran disección, su altitud promedio es de 2100 msnm.

El Valle de Ezequiel Montes – Tequisquiapan, se localiza al sur de zona entre la sierra de Tequisquiapan y de Enmedio, cubre un área de 25x10 km con una dirección NE-SW. Este valle es un corredor plano de pendiente muy suave que en el norte no presenta topoformas muy marcadas a excepción del cerro El Cerrito compuesto por brechas volcánicas. Entre Ezequiel Montes y Tequisquiapan destacan algunas prominencias alargadas de pendientes suaves compuestas principalmente por ignimbritas y tobas. El material de relleno del valle también principalmente materiales piroclásticos y alguna área de aluvión restringidas a los cauces de los ríos y arroyos.

3. GEOLOGIA

3.1 Estratigrafía

El marco geológico de la zona geohidrológica está conformado por rocas de composición y edad muy avanzada que abarcan desde el Cretácico medio representada por rocas sedimentarias hasta el cuaternario representado por basaltos y brecha volcánica, así como tobas y material aluvial, a continuación, se describen brevemente las unidades geológicas (figura 2).

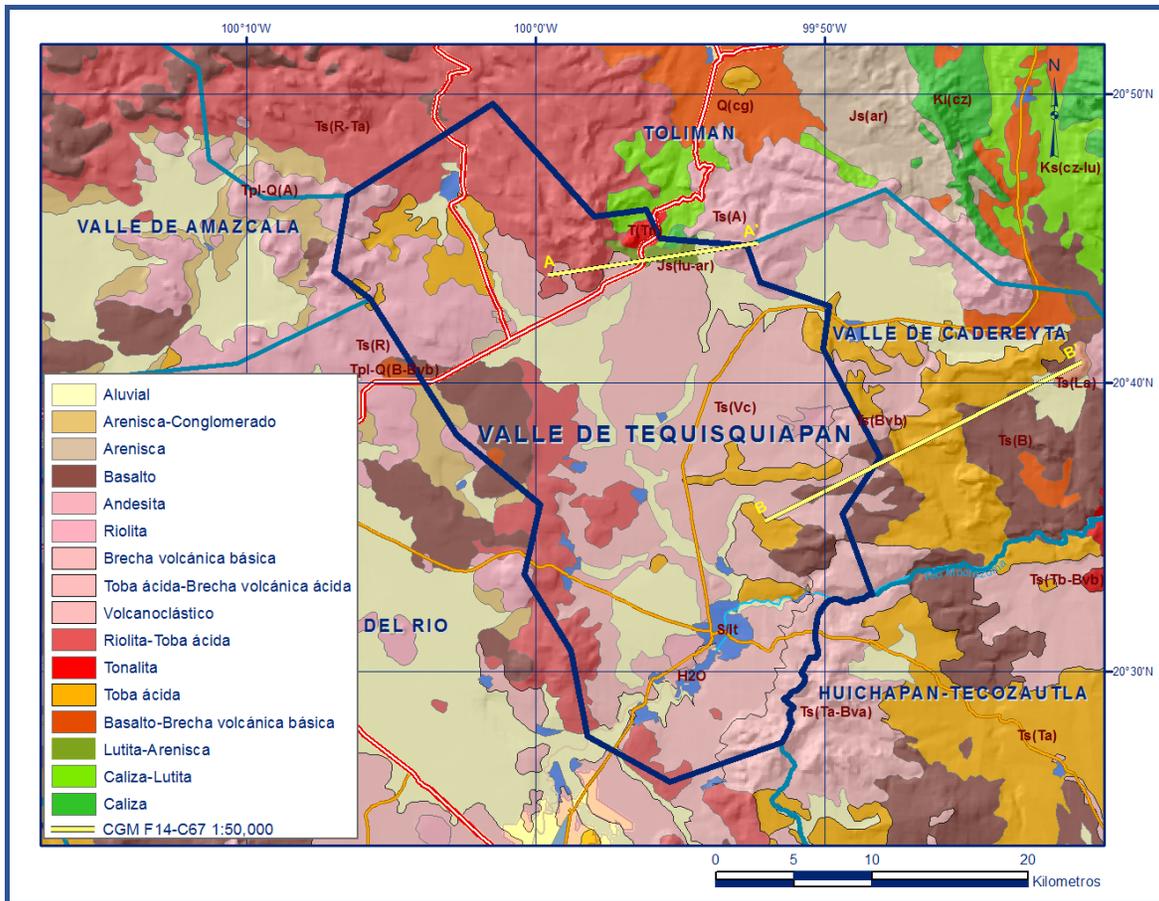


Figura 2. Geología general del acuífero

JURÁSICO

Rocas metamórficas (esquistos)

Se caracteriza esta unidad por afloramientos muy locales de rocas metamórficas del tipo de las pizarras y esquistos. En algunas zonas son de textura esquistosa, coloraciones claras (pardo y rosáceo), lustre sedoso, foliación muy fina, muy deletznable; mientras que en otras se presenta como rocas compactas de color gris claro con algunos bandeamientos de minerales ferrosos oxidados entre las fracturas.

Se distribuye en la zona noroeste del poblado de Bernal y sobre la carretera a Tolimán a partir del km 1 en pequeños afloramientos; encontrándose en contacto discordante con el intrusivo de Bernal en el arroyo Tetillas.

Esta unidad se podría explicar como producto del metamorfismo de contacto a que fueron sometidos los depósitos calcáreos por el intrusivo Bernal.

Sin embargo, durante los recorridos en la zona no se encontraron evidencias de lo anterior ya que en el contacto entre ambas unidades no existen rasgos de metamorfismo, sino sólo de procesos de asimilación magmática. Otra posibilidad es que esta secuencia forma parte de la Formación Las Trancas o ser el miembro superior de la Formación San Juan de la Rosa, ambas de edad Jurásico Superior.

CRETÁCICO

Formación Peña Azul

Se caracteriza por calizas de estratificación mediana a gruesa, con intercalaciones de lutitas laminares de poco espesor y limolitas. En el poblado de Bernal se observa una caliza packstone, gris oscuro que intemperiza a gris claro, en estratos delgados a medianos de 15 a 40 cm de espesor con bandas de pedernal negro y horizontes arcillosos gris claro (lutitas). La presencia de esta formación es notoria ya que su morfología se caracteriza por lomeríos de topografía suave y de coloración blanquecina debido a la cubierta de espesor considerable de caliche. En general es empleada como banco de material para la extracción de la roca caliza que se utiliza en la fabricación de cemento. Para esta unidad resulta difícil llevar un control estructural de los rumbos y echados de los estratos por el intenso plegamiento, fracturamiento y alteración a que fueron sometidos los mismos.

TERCIARIO

Intrusivo Peña de Bernal

La composición de este cuerpo varía de diorita a granodiorita presentando un color gris verdoso que intemperiza a gris pardo; la textura varía según el lugar, porfídica al centro y afanítica en los bordes. Este intrusivo se encuentra en el poblado de Bernal prolongándose con dirección al norte, presenta una forma oval en donde el eje mayor alcanza 3.75 km y 1.8 km en su parte transversal. Aún en la actualidad se desconocen sus dimensiones en el subsuelo ya que gran parte del "tronco" se encuentra cubierto por rocas carbonatadas de la formación Peña Azul.

La edad relativa que se le asigna a este intrusivo es de terciario temprano. Este cuerpo se encuentra intrusionando a la formación Peña Azul a la cual deforma.

Otros afloramientos se localizan al norte del poblado Tunas Blancas formando los cerros La Caja- Las Adjuntas- Las Cenizas y Zituní en el extremo septentrional de la zona de estudio.

Se observan andesitas con textura porfídica y en ocasiones fanerítica, de coloración gris oscuro que intemperiza a gris claro, se compone de plagioclasas (andesina-oligoclasa) ferromagnesianos alterados, minerales opacos y óxidos de hierro; se encuentran fuertemente fracturadas sin dirección preferencial.

Esta unidad se encuentra subyaciendo discordantemente a las unidades volcánicas Ignimbrita Amealco e Ignimbrita Huichapan en la porción meridional de la zona de estudio.

La edad relativa que se asigna a las andesitas La Virgen es Terciario Medio (Oligoceno - Mioceno), ya que subyacen a las ignimbritas Amealco y Huichapan que cuentan con estudio de fechamientos por K/Ar de 5 millones de años.

Ignimbrita Sierra de Enmedio

La unidad está compuesta por rocas de composición ácida (ignimbritas); la mineralogía está compuesta por cuarzo, vidrio, ácido, sanidino y plagioclasas; como minerales accesorios ferromagnesianos alterados, minerales arcillosos y óxidos de hierro; presenta estructura fluidal en algunos casos con ligero ondulamiento.

La coloración es de gris claro y rosado al fresco y pardo amarillento al intemperismo, su textura es afanítica con alineamientos de minerales principalmente de feldespatos potásicos, algunas vesículas rellenas por cuarzo botroidal y contiene en ocasiones esferulitas de sílice.

El grado de alteración es variable observando coalinización y oxidación en algunas zonas, ambas asociadas a fenómenos hidrotermales.

La presencia de yacimientos minerales de caolín y ópalo en la mina El Iris, poblado de Nueva Esperanza, mina San Agustín a 1.5 km de la terracería al poblado El Ciervo, mina el Redentor ubicada en el cerro del mismo nombre, mina Sombrerete al sur del poblado del mismo nombre, indican la relación con estos fenómenos.

Esta secuencia de ignimbritas se encuentran aflorando en lo que se denominó Sierra de Enmedio y presenta una orientación preferencial noroeste-sureste; localizándose durante el presente estudio varios puntos de muestreo y verificación en los cerros La Engorda, El Pelón, La Caja, El Zapote, La Carbonera, Garambullo y cerca de los Poblados, La Pila, Puerta de Enmedio, Nogales, Colón, Peñuela, La Zorra, Peña Colorada, Nueva Esperanza, El Gallo, La Palma, El Blanco, La Galera, Ajuchitlán, San Juan de la Laja, La Laja, La Fuente, Fuentezuelas, El Carrizal, La Llave y San Nicolás.

La unidad ignimbrita Sierra de Enmedio desde su parte meridional (poblado La Llave) hasta la septentrional (poblado Colón); presenta una orientación preferencial Noroeste-Sureste $15 - 20^\circ$ que de alguna forma es posible prolongar hacia el norte coincidiendo con las grandes estructuras volcánicas del Cerro El Mexicano y volcán El Zamorano.

La edad relativa que se asigna a esta unidad es Terciario Superior (plioceno) los eventos volcánicos que dan origen a estas rocas por relaciones estratigráficas y estructurales se emplazaron posteriormente a las unidades andesíticas y basálticas de La Virgen y San Juan respectivamente. Hacia la zona de los poblados El Tejocote y Santa Rosa de Lima se encuentran subyaciendo discordante a la unidad de Basaltos Lajeados.

En la porción norte de la zona de estudio y del poblado Colón se encuentra ubicado el estratovolcánico andesítico con ignimbritas de composición riolítica El Zamorano, al cual Demant le asigno una edad de Mioceno-Oligoceno, asociándolo a los extensos volúmenes de ignimbritas expulsados durante la formación de la Sierra Madre Occidental.

La similitud de rocas observadas en la zona norte de (Colón, San Martín y Ajuchitlán) durante los recorridos de campo con las que componen este evento, podrían indicar una asociación entre el origen de las ignimbritas Sierra de Enmedio con las extrusionadas por este aparato volcánico.

En la localidad cercana a la población San Martín se encuentra una alternancia de tobas líticas, pumíticas, vítreas y riolíticas con andesitas. Al noreste de Colón se reporta la presencia de tobas riolíticas intercaladas con tobas vítreas.

Basaltos Lajeados

La composición mineralógica que caracteriza a esta unidad es de plagioclasas, olivinos, anfíboles, ferromagnesianos, que la clasifican como basáltica.

El color de la roca es gris oscuro al fresco y pardo claro al intemperismo, su textura es afanítica y microcristalina en una matriz compacta, presenta lajeamiento y bajo grado de alteración.

Se encuentra aflorando en las inmediaciones de los poblados Santa Rosa de Lima, Las Cenizas, El Carrizal, El Cerrito, El Tejocote, El Gallo, San José de la Laja y Santa Bárbara dentro de lo que se denominó como Sierra de Enmedio. Se asignó una edad relativa de Terciario Superior sobreyaciendo a la unidad ignimbrita Sierra de Enmedio.

CUATERNARIO

Tobas y andesitas

Estas unidades están en los amplios valles conocidas como de San Juan del Río y Ezequiel Montes-Tequisquiapan, las cuales forman amplias mesetas de gran extensión y poca pendiente. Se encuentran intercaladas a lo largo de los valles ya mencionados. A continuación, se describen las unidades de forma independiente:

Tobas

Esta unidad se reporta como una secuencia de tobas de una coloración amarillo claro al fresco y café claro al intemperismo; el tamaño de los clastos varía de arenas gruesas a bloque los cuales están cementados sobre una matriz arcillo - limosa.

Estas tobas presentan graduación, donde se observa que los fragmentos del tamaño de bloques se encuentran en la base y el material más fino subyace a este.

La unidad se encuentra localizada rellenando los extensos valles de San Juan del Río cuya extensión se prolonga en dirección noroeste-suroeste con una amplitud promedio de 12 km y en el de Ezequiel Montes-Tequisquiapan en menor proporción.

Esta unidad se encuentra en posición normal tanto sobre los depósitos emitidos por la caldera de Amealco y Huichapan, es por esto que se le asigna una edad de Terciario.

Esta unidad se integra por rocas de composición andesítica de coloración gris oscuro al fresco y gris claro al intemperismo, su estructura es muy compacta, de textura afanítica con fenocristales de feldespatos potásicos complementado su mineralogía de cristales de vidrio, andesina, oligoclasa, epidota, hornblenda, minerales arcillosos y óxidos de hierro; al norte del poblado de Villa Progreso esta roca presenta foliación con una orientación y su fracturamiento presenta una dirección preferencial norte-sur.

Se localizaron afloramientos de esta unidad en la porción norte de la zona de estudio, cercano a los poblados de San Martín. Se le asigna de forma relativa una edad terciaria encontrándose estratificadas con las tobas antes descritas. Estos contactos fueron localizados al norte del poblado Villa Progreso, en la mina San Martín en el poblado del mismo nombre.

Basaltos

Esta unidad se encuentra integrada por basaltos y brechas volcánicas de composición básica.

En lo referente a los basaltos, se observan coloraciones que varían de gris oscuro a negro, presentan textura afanítica muy vesicular, cuya mineralogía se compone de plagioclasas, piroxenos ferromagnesianos y biotita; en ocasiones presenta un fuerte lajeamiento.

Los afloramientos localizados de esta unidad son reducidos, ya que se restringen a pequeños aparatos volcánicos distribuidos en la zona central del área de estudio comprendida entre los poblados La Llave y Ajuchitlán.

Con respecto a los basaltos se encuentran aflorando en los poblados de San Antonio, al noreste de La Valla, en la mina La Trinidad, La Laja, al norte de San Nicolás y al sur de Fuentezuelas.

Brechas volcánicas

Las brechas basálticas varían de rojizo a gris oscuro, su textura es afanítica de estructura brechoide, con algunos bloques de basalto, bombas volcánicas y fragmentos de pómez en una matriz fina, se observa con un alto grado de alteración de los minerales ferrosos. Los aparatos volcánicos que forman esta unidad son lomas redondeadas de poca altitud y pendientes.

Esta unidad se encuentra ubicada en la porción sur de San José de la Laja y los poblados de La Galera, Panales, al norte de Tierra Dura, al sureste de El Blanco, al oeste de Las Cenizas, en el banco de material de Las Cenizas, en el km 3 de la carretera de Ezequiel Montes al entronque a Bernal y en Villa Progreso.

Los afloramientos de esta unidad se observan generalmente alineados con orientación preferencial oriente-poniente, producto de su probable emplazamiento a lo largo de las fracturas regionales que se presentan en la misma dirección.

El sistema de fracturamiento oriente-poniente que se observa dentro del área de estudio, probablemente se produjo a finales del Terciario al Cuaternario, ya que se encuentra afectando más claramente a las unidades Ignimbritas Sierra de Enmedio e Ignimbritas Amealco, coincidiendo esta observación con estudios regionales realizados dentro del Eje Neovolcánico Mexicano. Dado que se asocia la formación de dichos fracturamientos con el posterior emplazamiento de los basaltos, se asignó a esta unidad una edad relativa Cuaternario. En esta unidad se agrupan los depósitos de tipo aluvial, piedemonte y suelo residual.

Depósitos aluviales

Se encuentran distribuidos principalmente en los cauces de arroyos, ríos y lagos. Así mismo se localizan cubriendo de manera discordante a las tobas que rellenan los extensos valles de San Juan del Río, cuya extensión se prolonga en dirección noroeste-sureste con una amplitud promedio de 12 km y al de Ezequiel Montes - Tequisquiapan en menor proporción. El espesor de los mismos es variable, encontrando en algunas zonas entre 20-30 cm y en otras de 1-5 m.

En algunos cortes litológicos de pozos perforados en los mencionados valles se encontraron espesores desde 5 hasta 18 m se componen de materiales de diversos tamaños que van de arcillas hasta bloques redondeados de diferente composición de rocas preexistentes. Algunos paquetes de estos depósitos presentan graduación de los clastos que la componen.

La columna estratigráfica representativa del área de estudio fue obtenida a partir de varios cortes litológicos que representan varios pozos, así como de la información de los sondeos eléctricos realizados en el área.

Se determinaron tres unidades en forma generalizada, con características hidráulicas y litológicas contrastantes; es importante mencionar que para clasificar las unidades anteriores se analizaron las resistividades que presentaron, así como el espesor involucrado.

Relleno Aluvial y Lacustre

Se presenta después del suelo vegetal y hasta una profundidad promedio de 70.0 m; el límite inferior se localiza a unos 140.0 m.

El material que constituye esta unidad es como sigue:

- Material lacustre formado por limos que presentan varias coloraciones, son fragmentos de andesita y riolita.
- Gravas, gravillas y boleos empacados en material arcilloso; los boleos son fragmentos de andesita y riolita.
- Tobas lacustres de pómez.
- Existen también algunos horizontes formados por escoria volcánica como el tezontle.
- Material arenoso de grano medio a fino.

Esta unidad permeable puede constituir un acuífero si el nivel de saturación es somero y se almacena agua en un espesor significativo.

Andesita fracturada

Se presenta subyaciendo a la unidad anterior y se encuentra a una profundidad promedio de 170.0 m. Su límite inferior se localiza a aproximadamente a 210.0 m de profundidad.

Esta es la unidad productora principal del área ya que por su fracturamiento los pozos captan caudales apreciables de agua en esta.

Depósitos Arcillo - Limosos con presencia de gravas y gravillas

Subyace a la unidad 2 y se localiza a una profundidad aproximadamente de 215.0 m en promedio. Su límite inferior no ha sido atravesado pero los sondeos eléctricos indican que es mayor a 300.0 m de profundidad.

Esta unidad presenta baja resistividad, se asocia con depósitos granulares como arcillas y limos con gravas y arenas probablemente saturadas, pero de escasa permeabilidad.

4. HIDROGEOLOGIA

En la zona geohidrológica se ha revisado un sin número de actividades de exploración geofísica consistente en sondeos eléctricos verticales tipo Schlumberger distribuidos en varios perfiles cuya ubicación se localiza en todo el valle con el fin de tener una idea de la distribución de las resistividades aparentes y proporciona un criterio para la interpretación cuantitativa e integración con los datos geológicos. Así mismo se han elaborado mapas de isorresistividades aparentes a diferentes aberturas para conocer tridimensional el comportamiento eléctrico estructural del subsuelo.

4.1 Piezometría

Con el propósito de conocer la posición y la evolución que presentan los niveles de agua subterránea, se han estado realizando a partir del año de 1994 dos recorridos de medición de niveles, el primer recorrido se efectuó en los meses de mayo y junio y el segundo durante los meses de noviembre y diciembre.

Estos recorridos se están realizando conjuntamente con personal de Gobierno del Estado, la Comisión Nacional del Agua y de la Asociación de Agricultores y Ganaderos de Querétaro, se da a continuación un panorama general de las condiciones de la distribución espacial de las profundidades del nivel del agua.

4.2 Comportamiento hidráulico

4.2.1 Profundidad al nivel estático

Respecto a la profundidad del nivel estático en diciembre de 1997 en el valle de Tequisquiapan se observan rangos de valores entre 20 y 180 m como mínima y máxima.

Las curvas de mayor profundidad se localizan en el estrecho norte que limita el valle; al sur de la población de Colón se tienen rangos entre 40 y 60 m; hacia el extremo poniente en las inmediaciones de las poblaciones de Santa Rosa de Lima y Ajuchitlán se tienen valores entre 60 y 100 m, tendiendo a ser más someros hacia el poblado de la Tortuga.

Finalmente, los valores más someros se localizan en la ciudad de Tequisquiapan con valores entre 10 y 20 m, en los años 80's en esta zona el agua brotaba a través de manantiales y era aprovechada con fines recreativos.

4.2.2 Elevación del nivel estático

Las curvas de elevación del nivel estático presentan los valores de 1830 msnm como mínima y 1920 msnm como máxima; las curvas de mayor elevación se localizan entre la población de Ezequiel Montes donde pasa la curva 1900 msnm y hacia el sur hacia la población de San Francisco se encuentra la curva de 1840 msnm, entre esta población y San Nicolás se encuentran las curvas 1830 msnm a 1870 msnm con tendencia a ascender.

4.2.3 Evolución del nivel estático

Respecto a los valores de evolución en el periodo de 1986-1987 en el valle en general se presentan en rangos que oscilan entre -0.5 y -3.0 m o lo que nos da un promedio de -1.75 m.

En el área de Colón se presenta un abatimiento promedio entre -0.5 y -1.0 m, a partir de este punto el abatimiento se incrementa hasta alcanzar valores de entre 3.0 y -2.0 m al este de Ezequiel Montes formando dos conos de abatimiento, siendo en esta área donde se presenta la mayor evolución con -3.0 m.

Hacia el sur paralelamente a la barrera geohidrológica del lado Este del Valle desde Fuentezuelas hasta el llegar a San Nicolás se tiene una evolución de -0.5 m.

Respecto a la realización de pruebas de bombeo, se realizaron varias pruebas por parte de la Empresa Guysa S. A. y se interpretaron otras realizadas en años anteriores que han servido como apoyo para conocer las características hidráulicas del acuífero y sirvieron para la realización del balance Hidráulico subterráneo.

4.3 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La interpretación hidrogeoquímica se basa en el análisis de las diversas representaciones gráficas de los análisis químicos: las isolíneas de las distintas concentraciones o relaciones iónicas, así como los diferentes diagramas comparativos entre los más usados son: Shoeller, Wilcox y Piper.

Estos diagramas se utilizan para la clasificación del agua conforme a su relación iónica, la cual permite la identificación de las posibles fuentes acuíferas, así como para delimitar zonas atendiendo a la calidad del agua.

La cantidad y tipo de compuestos en solución va a depender tanto de la composición química de las rocas como de algunas propiedades físicas del acuífero. La cantidad de elementos disueltos en el agua será tanto mayor cuanto más permanezca y avance su recorrido (circulación regional), ya que tendrá más tiempo de contacto con los minerales solubles de las rocas por las cuales circula. En la actualidad la mayoría de los cuerpos de agua superficial se encuentran contaminados ya sea en mayor o menor medida, dependiendo de la cercanía con las fuentes emisoras de los contaminantes; el río San Juan localizado en la ciudad de San Juan del Río y Tequisquiapan no queda exento de este fundamento ya que su cauce alberga descargas municipales e industriales principalmente.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el periodo Nov. – Dic. de 1995 con el fin de evaluar la posible contaminación del acuífero a través del monitoreo y detección de posibles focos de emisión de contaminantes, así como su movilidad en el acuífero de la ciudad de San Juan del Río y con el fin de conocer el grado de contaminación del agua subterránea en la ciudad de San Juan del Río se efectuó el análisis de grasas–aceites, plomo, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y coliformes totales.

Cabe reiterar que el agua muestreada del acuífero que, bombeada a diferentes profundidades según los niveles dinámicos de las captaciones, así como de diversas condiciones físicas.

El acuífero de la ciudad de San Juan del Río y del valle de Tequisquiapan es anisotrópico ya que está formado por una serie de depósitos granulares y de derrames volcánicos lo cual modifica las condiciones del paso de agua a través de su estructura, ya sea en medios granulares o en medios fracturados.

Se observa un marcado paralelismo con rumbo general norte–sur, entre la isolínea de grasas de 30mg/l y los cuerpos de agua superficiales como son el cauce del río San Juan y la presa Centenario. A partir de aquí y hacia el franco poniente la concentración disminuye la porción oriental, cuyo valor configurado llega a los 50 mg/l. El promedio para este valle se puede decir que la concentración de grasas y aceites fue de 25 mg/l.

Por otra parte, los resultados de los análisis químicos realizados a muestras de agua superficial, indicarán niveles de concentración de grasas-aceites similares a los de aguas subterráneas.

En la porción sur de Tequisquiapan presenta concentraciones de plomo mayores a 10 mg/l, 3 mg/l, por ejemplo, el pozo 2165 con 12.6 mg/l, las cuales disminuyen hacia la presa el Centenario.

Por otra parte, los resultados de los análisis químicos realizados a muestras de agua superficial, indicaran niveles de concentración de plomo similares a los de aguas subterráneas.

La concentración promedio de demanda química de oxígeno en el valle fue de 1 mg/l, la cual presenta la tendencia a aumentar hacia la localidad de San Nicolás y la presa Centenario. Los resultados de las muestras de agua superficial indicaron, como era de esperarse, altos valores en este parámetro debido al alto contenido de materia orgánica.

De igual manera que para el acuífero de la ciudad de San Juan, los resultados de los análisis de nitratos para el valle de Tequisquiapan se encuentran arriba de la norma establecida para uso de agua potable.

El grado de concentración llegó a ser hasta 4 veces en orden de magnitud de dicho límite. La concentración promedio fue de 10 mg/l y los máximos valores fueron en el pozo 838 de 24.12 mg/l y en el pozo 863 de 24.18 mg/l. Los resultados de los análisis químicos para aguas superficiales indicaron la ausencia de este parámetro.

Para este valle no existe problema alguno, relacionado con las concentraciones de sulfatos, se presentaron muy por debajo de las normas establecidas de 500 mg/l. El valor significativo se presentó solo en el puente San Nicolás con 445 mg/l (1995).

Solo se detectó la presencia de nitrógeno total en los pozos 838 (2.8 mg/l), pozo 880 (1.9 mg/l) y en el pozo 1693 (1.5 mg/l).

Las muestras de agua superficial de la presa Centenario y el puente San Nicolás, reportaron valores de 5 y 33 mg/l respectivamente. Los demás resultados indicaron ausencia de este contaminante.

En la mayoría de los pozos se obtuvieron concentraciones de coliformes totales de cero, únicamente se presentaron índices de contaminación en pozo 863 (73 UFC / 100 m³), pozo 869 (230 UFC / 100 m³) y en el pozo 1178 (91 UFC / 100 m³).

Los resultados de los análisis de las muestras de agua superficial de la presa Centenario y puente San Nicolás indicaron altos contenidos de Coliformes de 9300 y 110,000 UFC / 100 m³, lo que indica su alta contaminación de este parámetro en cuerpos de agua superficial y de la potencialidad para contaminar las aguas subterráneas.

La concentración de sólidos totales disueltos, para la porción sur de la ciudad de Tequisquiapan la concentración llegó a ser de 350 mg/l, como valor máximo en aguas subterráneas. En las muestras de aguas superficiales los valores fueron altos: 1786 mg/l para la Presa Centenario y 788 mg/l en el puente de San Nicolás, si consideramos que el máximo permitido es de 1000 mg/l.

Para el valle de Tequisquiapan el valor promedio en la conductividad eléctrica fue de 350 μ mhos/cm y con valores máximos de 709.63 μ mhos/cm, superiores a la norma de 500 μ mhos/cm.

De acuerdo con la clasificación de Wilcox, que evalúa de acuerdo al grado de salinidad y el contenido de sodio, obteniéndose una clasificación de las clases: C₂ - S₁, C₁- S₁ y C₃ - S₁, las cuales corresponden a agua de buena calidad.

De acuerdo con la clasificación con el diagrama triangular de Piper, se observó con respecto a los aniones todas las muestras se clasificaron como bicarbonatadas, en cuanto a los cationes pertenecen a la familia de aguas sódicas, además también se tienen aguas mixtas y aguas cálcicas.

5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

La actualización del censo de aprovechamientos se ha llevado en forma sistemática a partir del año de 1991 en el que el Gobierno de Estado a través de la Comisión Estatal de Aguas contrató los servicios de la empresa Guysa con el fin de darle el seguimiento a la situación que guardan todos los pozos ubicados dentro del valle.

Previo a este trabajo se proporcionó un listado y plano general del censo por parte de la Comisión Nacional del Agua de todos los pozos ubicados en el valle, así como características constructivas de los niveles, caudales litológicos y en general toda la información que hasta esa fecha se controla en la Comisión.

Con base en la información proporcionada se programaron visitas y recorridos a todos los aprovechamientos, de esta manera fue posible actualizar el censo y asignar el número correspondiente a aquellos que no contaban con él, de tal forma que se tiene la actualización hasta el año de 1997.

En este valle se tienen censados 308 pozos, de los cuales 220 corresponden al uso agrícola, 88 al público urbano, que extraen un volumen medio anual de 118 millones de metros cúbicos (hm^3).

6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se realizó la actualización del balance volumétrico de aguas subterráneas, con el propósito de evaluar las condiciones de funcionamiento del Valle de Tequisquiapan. A la fecha en estas zonas se han localizado nuevas reposiciones de pozos, las cuales se han integrado al funcionamiento del acuífero, de tal forma que se cuenta con una historia de censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría y pruebas de bombeo más completa de los mismos.

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:

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

La ecuación de balance considerada para el Valle de Tequisquiapan es de la siguiente forma:

$$E + S = AV * S$$

Dónde:

E = entradas totales al sistema

S = salidas totales del sistema

AV = cambio de almacenamiento

S = coeficiente de almacenamiento

La ecuación anterior expresa la diferencia entre los volúmenes de recarga y descarga para un sistema acuífero y equivale al cambio en el volumen de almacenamiento para un período de tiempo determinado.

Para la zona de balance que comprende el valle de Tequisquiapan- Ezequiel Montes-Colón y que cubre un área de 291 km², los términos de la ecuación que intervienen en el comportamiento hidráulico del acuífero son:

$$E = E_s + R_r + R_v$$

Dónde:

E_s = entradas subterráneas

R_r = retornos por riego

R_v = recarga vertical

Salidas totales del sistema

Los términos que involucran a las salidas totales del sistema, se expresan por la siguiente fórmula:

$$S = B + S_s$$

Donde:

B = extracción por bombeo de pozos

S_s = salidas subterráneas

Almacenamiento del sistema

$$AV * S$$

± VA = cambio de almacenamiento

S = coeficiente de almacenamiento

De esta forma involucrando todos los términos mencionados anteriormente en la ecuación general de balance se tiene:

$$(Es + Rv + Rr) - (B + Ss) = \pm Av * S$$

En la ecuación anterior el coeficiente de almacenamiento es un dato obtenido en el estudio de 1992 realizado por Guysa S.A.

Entradas y salidas subterráneas

Para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas del sistema se utilizaron las configuraciones de elevación del nivel estático correspondientes al mes de diciembre de 1994 a diciembre de 1996, de esta forma se identificaron las direcciones de flujo preferencial y los gradientes entre las curvas equipotenciales.

Retornos por riego

En vista que el 86% del volumen de extracción de agua subterránea se utiliza para riego agrícola en el valle, se hizo el cálculo de los retornos por riego utilizando la metodología propuesta en el estudio geohidrológico de 1992 elaborado por la empresa Guysa S.A.

La SAGAR proporcionó a esa compañía una tabla con valores de lámina neta, lámina bruta y uso consuntivo para diversos tipos de cultivos en la zona, además de las superficies totales destinadas para el riego en su ciclo agrícola correspondientes a 1996.

Los volúmenes de retorno se calcularon a partir de la lámina neta menos el uso consuntivo, multiplicada a su vez por el área de riego de esta forma se obtuvo un volumen de retorno para el periodo de enero a diciembre en todo el valle de Tequisquiapan.

Extracción por bombeo

El volumen de extracción por bombeo se tomó de la hidrometría subterránea correspondiente al seguimiento de 1996 por considerar que cubren la totalidad del valle.

Volúmenes de extracción por bombeo en la zona de balance para 1996

Uso	Volumen (hm³)
Agrícola	107.3
Abrevadero	3.9
Potable	6.8
Total	118

Cambio de almacenamiento

Para el cálculo del cambio de almacenamiento se utilizó la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo diciembre de 1994 a diciembre de 1996.

El valor del coeficiente de almacenamiento considerado para la ecuación de balance, es el mismo que se usó en el estudio de 1992 por Guysa S. A. su valor es de 0.055.

Solución de la ecuación de balance

Una vez definidos los términos de la ecuación procederemos a dar solución a la ecuación de balance considerando que esta se aplica para el período de diciembre de 1994 a diciembre de 1996.

Si aplicamos la solución de balance para el año de 1996, se tiene (Valores en hm³/año):

$$E_s = 7.3$$

$$S_s = 2.6$$

$$R_r = 45.2$$

$$B = 118.0$$

$$R_v = 55.6$$

$$A = 291 \text{ km}^2$$

De esta forma el valor de entradas y salidas del sistema es igual a:

$$**E = E_s + R_r + R_v**$$

$$E = 108.1$$

$$S = B + S_s$$

$$S = 120.6$$

Los resultados anteriores indican que existe un déficit de 12.5 hm³ entre la recarga y descarga total del acuífero lo que equivale al 10.38% de la recarga total y esto representa un abatimiento de 0.30 m al año.

7. 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

7.1 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 **108.1 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

7.2 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 **2.6 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas.

7.3 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 **110,649,624 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**.

7.4 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 108.1 - 2.6 - 110.649624 \\ \text{DMA} &= -5.149624 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **5,149,624 m³ anuales**.

8. BIBLIOGRAFÍA