



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE SAN JUAN DEL RÍO (2203),  
ESTADO DE QUERÉTARO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>2</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
1.1. Localización	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD</b>	<b>6</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA</b>	<b>7</b>
3.1. Provincias fisiográficas	7
3.2. Clima	8
3.3. Hidrografía	9
3.4. Geomorfología	10
<b>4. GEOLOGÍA</b>	<b>10</b>
4.1. Estratigrafía	12
4.2. Geología estructural	15
4.3. Geología del subsuelo	16
<b>5. HIDROGEOLOGÍA</b>	<b>17</b>
5.1. Tipo de acuífero	17
5.2. Parámetros hidráulicos	18
5.3. Piezometría	18
5.4. Comportamiento hidráulico	18
5.4.1. Profundidad al nivel estático	18
5.4.2. Elevación del nivel estático	19
5.4.3. Evolución del nivel estático	21
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	22
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA</b>	<b>23</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS</b>	<b>23</b>
7.1. Entradas	23
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	24
7.1.3. Recarga incidental (Ri)	26
7.2. Salidas	27
7.2.1. Bombeo (B)	27
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	27
<b>8. DISPONIBILIDAD</b>	<b>28</b>
8.1. Recarga total media anual (Rt)	28
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	29
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	29
8.4. Disponibilidad de agua subterránea (DAS)	29
<b>9. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>31</b>

## **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 San Juan del Río, definido con la clave 2203 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo sur del estado de Querétaro, en el límite con los estados de Hidalgo, México y Guanajuato, entre los paralelos 20°03'25" y 20°42'57" de latitud norte y los meridianos 99°49'53" y 100°21'47" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,031 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con los acuíferos Valle de Amazcala y Valle de Tequisquiapan; al noreste con este mismo acuífero Valle de Tequisquiapan; al sur con Valle de Amealco, al oeste con Valle de Huimilpan; al noroeste con Valle de Querétaro, todos pertenecientes al estado de



Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende casi la totalidad de los municipios San Juan del Río y Pedro Escobedo, en menor proporción Amealco de Bonfil, El Marqués y Colón, así como porciones pequeñas de Tequisquiapan, Huimilpan y Querétaro.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

**ACUIFERO 2203 VALLE DE SAN JUAN DEL RIO**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	16	35.0	20	36	30.0	
2	100	20	38.0	20	40	8.0	
3	100	14	28.7	20	40	14.2	
4	100	10	19.0	20	40	40.0	
5	100	5	42.9	20	42	55.5	
6	100	2	43.7	20	38	11.6	
7	99	59	49.6	20	35	46.6	
8	100	0	24.1	20	33	22.7	
9	99	58	46.3	20	30	44.5	
10	99	58	12.3	20	27	44.8	
11	99	55	22.0	20	26	11.2	
12	99	51	28.7	20	27	32.6	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE ESTATAL
13	99	50	31.2	20	16	53.4	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	99	59	50.3	20	5	14.1	
15	100	3	50.2	20	10	20.2	
16	100	8	30.8	20	10	47.0	
17	100	9	56.6	20	9	57.4	
18	100	9	53.9	20	14	27.7	
19	100	13	34.8	20	16	20.8	
20	100	15	8.0	20	16	7.2	
21	100	14	45.1	20	21	20.7	
22	100	16	28.2	20	24	31.5	
23	100	19	6.4	20	29	3.9	
24	100	21	45.0	20	31	27.0	
1	100	16	35.0	20	36	30.0	

**1.2. Situación administrativa del acuífero**

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca IX “Golfo Norte”, al consejo de Cuenca Río Pánuco, instalado el 26 de agosto de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Querétaro. Su territorio se encuentra parcialmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda. La porción norte está regida por el “Decreto que establece veda

para el alumbramiento de aguas del subsuelo, en la zona de los valles de Querétaro y San Juan del Río, en el Estado de Querétaro., publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 3 de enero de 1958. En un pequeño rectángulo inmerso dentro de esta primera veda mencionada, rige el “Decreto que establece por tiempo indefinido, veda para el alumbramiento de las aguas del subsuelo, en el área denominada Alberca de la Cañada, en Villa del Marqués, Qro”, publicado en el DOF el 13 de octubre de 1949. En la región central y suroriental está vigente el “Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos de la zona circunvecina a los Valles de Querétaro y San Juan del Río, Qro.”, publicado en el DOF el 6 de febrero de 1976. Estos tres decretos son de tipo II, en los que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. Por último, en una pequeña zona del extremo este, rige el “Decreto que amplía el perímetro de la veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo, señalado por el decreto de 18 de octubre de 1950”, publicado en el DOF el 3 de diciembre de 1960. Esta veda es tipo I, en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

En las porciones sur y suroriental no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea; esta porción no vedada se encuentra sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 21 acuíferos que se indican”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, se prohíbe 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, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

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

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. Los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero del Valle de San Juan del Río, A.C., instalado el 21 de octubre de 2004. En la porción central de su territorio se localiza el Distrito de Riego 023 “San Juan del Río” y en una pequeña área de su extremo suroriental se localiza parte del Distrito de Riego 096 “Arroyo

Zarco”, que comparte con los acuíferos Polotitlán del Estado de México y Huichapan-Tecoautla del estado de Hidalgo.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos de cobertura regional, los más relevantes se describen a continuación:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES DE QUERÉTARO, SAN JUAN DEL RÍO Y TEQUISQUIAPAN, EN EL ESTADO DE QUERÉTARO. Realizado en 1970 por Ingeniería y Sistemas, S.A. (INSISA) para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH).** Su objetivo fue la evaluación preliminar de la recarga media anual que recibían los acuíferos de los valles de San Juan del Río, Querétaro y Tequisquiapan, en el estado de Querétaro y su relación con la magnitud de la extracción de aguas subterráneas. Incluye actividades de campo como censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, nivelación de brocales de pozos, piezometría, realización de pruebas de bombeo, ejecución de sondeos geofísicos, muestreo de agua para análisis fisicoquímicos y balance de aguas subterráneas. Concluye que para el periodo analizado que fue menor de un año, salvo la zona urbano-industrial de la ciudad de Querétaro que ya mostraba una sobreexplotación local, los acuíferos de los valles estudiados se encontraban sobreexplotados. Recomienda la construcción de un modelo matemático de simulación de los acuíferos para predecir el comportamiento de los niveles del agua subterránea ante diferentes alternativas de extracción futuras.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO Y ZONAS DE TEQUISQUIAPAN, AMAZCALA, COLÓN Y EZEQUIEL MONTES, ESTADO DE QUERÉTARO. Realizado en 1981 por la Secretaría de Agricultura Recursos Hidráulicos (SARH), Representación General en el estado de Querétaro.** Entre sus actividades de campo consideró censo e hidrometría, piezometría y prospecciones geofísicas

**ESTUDIO PRIORITARIO DEL ESTADO DE QUERÉTARO. Realizado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional de Agua en 1991.** Sus objetivos fueron determinar la interrelación que existe entre el flujo de agua superficial y el subterráneo en los acuíferos de la entidad; conocer el marco geohidrológico de las diferentes unidades permeables de cada zona y realizar el balance geohidrológico para determinar su disponibilidad, con el propósito de prevenir la sobreexplotación. Calculó una recarga media anual de 289 hm<sup>3</sup>, una extracción de aguas subterránea de 400 hm<sup>3</sup>, un cambio de almacenamiento de -103.5 hm<sup>3</sup>. La diferencia en la relación extracción/recarga señaló un déficit de 111.0 hm<sup>3</sup> anuales que indicaban la sobreexplotación intensiva.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL VALLE DE QUERÉTARO, EN EL ESTADO DE QUERÉTARO.** Realizado en 2013 por la Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias Unidad Juriquilla, para la Dirección Local Querétaro de la Comisión Nacional del Agua. Sus objetivos fueron determinar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero evaluando sus características hidrogeológicas y apoyadas en el análisis de la información piezométrica. Considera la construcción de un modelo de flujo hidrodinámico para conocer las condiciones y efectos de las variables hidrológicas en el comportamiento de los niveles del agua subterránea.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO VALLE DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO.** Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Querétaro, 2023. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincias fisiográficas**

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Raisz (1964), la superficie de acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Según el Instituto de Geografía y Estadística, el acuífero en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico; casi la totalidad en la Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo. El extremo suroriental se ubica en la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac y la región occidental pertenece a la Subprovincia Mil Cumbres.

El Eje Neovolcánico es una provincia cenozoica de origen volcánico formada en un ambiente tectónico de arco continental (Ortega-Gutiérrez et al., 1992), se caracteriza por una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica producto de coladas de lava, conos cineríticos, domos de lava, maars, volcanes escudo, volcanes compuestos y calderas, que se emplazaron en episodios sucesivos entre el Mioceno y Cuaternario. Está orientado en dirección este-oeste atravesando la porción central de la República Mexicana, uno de los rasgos más característicos es la presencia de una franja de estratovolcanes que se extienden casi en línea recta alrededor del paralelo 19°. Además de estos estratovolcanes y volcanes tipo escudo, esta provincia también incluye sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, así como estructuras de calderas volcánicas. Otra característica de esta provincia fisiográfica es la existencia de numerosos aparatos volcánicos orientados en dirección desde el oeste, como es el volcán de Colima, hasta la parte oriental de la provincia, representados por los volcanes Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Cofre

de Perote y La Malinche. Existen otros muchos conos volcánicos que, aún y cuando su extensión es amplia, no alcanzan la magnitud de los mencionados.

La Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo se extiende desde el oeste de la ciudad de Querétaro, hasta Pachuca, Hidalgo. De oeste a este presenta un corredor de lomeríos bajos de material volcánico y llanuras, que presentan elevaciones menores a 2,000 msnm encerradas desde todos los lados por sistemas de sierras, mesetas y lomeríos, casi todos de origen volcánico, de mayores elevaciones. Sólo una cumbre, la del cerro Nopala al sur de Huichapan, Hidalgo, tiene más de 3,000 m de altitud. La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se distingue por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas. Se diferencia de la subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo por la edificación de significativos espesores lávicos y piroclásticos característicos del Eje Neovolcánico.

La Subprovincia Mil Cumbres es de relativamente poca extensión en el estado de Querétaro ya que solo penetra en dos pequeñas áreas de su extremo suroeste y lleva el nombre tradicional de su extremo oeste sobre la ruta Morelia-Zitácuaro. Se caracteriza por ser una región accidentada y complicada por la diversidad de sus geoformas, descendente hacia el sur, conformada por sierras volcánicas complejas debido a la variedad de sus antiguos aparatos volcánicos, mesetas lávicas escalonadas, lomeríos basálticos y el valle por el cual el río Lerma se dirige hacia la Presa Solís.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, en el área cubierta por el acuífero predominan los climas templados subhúmedos en sus variantes C(w1), C(wo) y C(w2), que se caracterizan por presentar una temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18° y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C; con régimen de lluvias de verano y porcentaje de lluvias invernales del 5 al 10.2% del total anual. La diferencia entre ellos radica en el índice P/T; para el primero varía entre 43.2 y 55, para el segundo es menor de 43.2 y para la tercera variante es mayor de 55.

En la región norte el clima es semiárido semicálido BStlw, que se caracteriza por presentar temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia

invernal del 5% al 10.2% del total anual. En la zona oriental domina el clima semiárido templado BSkw, en tanto que en la porción central, occidental y suroriental se registra clima templado subhúmedo C(wo) y C(w1); en ellos la temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C, con temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. En ambos climas el régimen de lluvias es de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. En dos últimos tipos de clima, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y el índice P/T menor de 43.2.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 12 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Querétaro, Coyotillos, El Salitre, Huimilpan, Pedro Escobedo, San Juan del Río, Presa Centenario, Palmillas, Galindillo, El Rincón, San Pablo y Polotitlán, cuyo registro más amplio comprende el periodo 1979-2019. Con estos datos y utilizando el método de polígonos de Thiessen se determinaron los valores de precipitación y temperatura media anual de **595.0 mm/año** y **16.6 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial media, se obtuvo un valor de **1,830 mm/año**, el máximo valor medio se presenta en el mes de mayo.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia; uno de junio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los sistemas frontales que afectan la región. Julio es el mes más lluvioso y mayo el más seco.

### **3.3. Hidrografía**

El territorio del acuífero se ubica en el parteaguas entre las Regiones Hidrológicas (RH) No. 26 “Pánuco” y la RH12 “Lerma-Chapala-Santiago”. La mayor parte de él se localiza en la primera región hidrológica, Subregión Hidrológica San Juan Querétaro, en la cuenca del Río Moctezuma, subcuencas Drenaje Caracol, Río San Juan, Río Prieto y Arroyo Zarco. La zona norte que se ubica en la RH 12, pertenece a la cuenca el Río Laja, subcuenca Río Apaseo. El principal colector es el Río San Juan, que recibe este nombre después de la unión del Río Arroyo Zarco con el Río Prieto; sus afluentes principales son los arroyos Galindo, La D, Paso de Mata, Cano, La H y los drenes Caracol, La Culebra y Banthi.

La infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales está representada por las presas de almacenamiento que abastecen al Distrito de Riego 023 San Juan del Río: San Idefonso ubicada al sur del acuífero, Constitución de 1917 y La

Llave ubicadas en el centro y La Venta ubicada al noreste; así como las derivadoras Lomo de Toro y Constitución de 1917, ubicadas en la porción central.

### **3.4. Geomorfología**

En este sector del Eje Neovolcánico, la acción de los agentes erosivos, que incluyen procesos magmáticos, tectónicos, erosivos y de relleno, han definido las variaciones del relieve. Estos eventos dieron origen a la formación de cuencas endorreicas rellenas de materiales piroclásticos y lacustres con cenizas volcánicas, además de facturas y fallas. La porción septentrional del Eje Neovolcánico se caracteriza por eventos volcánicos de muy diferentes edades y composición litológica que a grosso modo proporcionan desde una morfología de elevaciones topográficas abruptas con un relieve conspicuo hasta lomeríos de formas redondeadas de poca inclinación en sus laderas.

En función de sus rasgos geomorfológicos, se identifican tres principales unidades: sierras, lomeríos y valle. Las sierras representan los límites topográficos del acuífero, están constituidas por rocas basálticas, andesíticas y riolíticas, entre las que destacan las sierras de En medio, localizada en la porción central, Tequisquiapan, al oriente, San Juan del Río al sur y Huimilpan al occidente. La sierra San Juan del Río se caracteriza por presentar numerosos estratovolcanes, con elevaciones promedio de 2100 msnm, compuestos principalmente por rocas volcánicas básicas a ácidas; que en su porción occidental presenta amplias mesetas con gran escurrimiento, debido a que están conformadas por materiales volcánicos impermeables.

Los lomeríos ocupan la mayor superficie, se localizan en la zona de transición entre las sierras y el valle; están representadas por elevaciones de poca altura y de formas redondeadas, conformadas por las mismas rocas volcánicas que constituyen las sierras. El valle forma un gran llano de pendientes suaves, en el cual sobresalen algunos lomeríos de colinas redondeadas e inclinaciones moderadas, los cuales están alineados en la misma dirección del valle; relleno por materiales piroclásticos y aluviales.

## **4. GEOLOGÍA**

La geología de la zona está representada por rocas ígneas extrusivas de composición ácida, intermedia y básica que afloran en las sierras de topografía abrupta, mientras que en los valles y pie de monte existen depósitos de origen aluvial (figura 2). Las rocas más antiguas corresponden a la secuencia volcánica constituida por rocas riolíticas y derrames de andesita cuya edad se ha asignado al Oligoceno-Mioceno por su posición estratigráfica; afloran principalmente al noreste y suroeste del acuífero, constituyendo sus límites

topográficos y formando estructuras tipo domos riolíticos con fracturamiento en forma de diaclasas, y moderado fracturamiento secundario. En el extremo sureste del acuífero se observa una unidad andesítica del Mioceno, que sobreyace a las riolitas del Oligoceno. Sus afloramientos se concentran al sur del acuífero, principalmente en el Cerro La Muralla, así como al noroeste de la Ciudad de Tequisquiapan. Las secuencias volcánicas forman parte de la cubierta del Eje Neovolcánico.

La actividad ígnea del Mioceno produjo derrames volcánicos de composición félsica constituidos por riolitas de estructura fluidal y textura porfídica, así como tobas líticas y piroclásticas riolíticas. También en el Mioceno ocurren derrames de andesita-basalto con textura afanítica que varía a porfídica y vesicular, expuestos como oleadas de delgados flujos bien definidos, cubiertos por depósitos de toba andesítica que se erosiona fácilmente. El vulcanismo máfico-intermedio inicia con el emplazamiento de rocas andesíticas, así como con derrames de andesita-basalto con textura afanítica, que puede variar a porfídica y vesicular, expuestos como oleadas de delgados flujos bien definidos, cubiertos a su vez por depósitos de tobas andesíticas que se erosionan fácilmente, originando afloramientos irregulares.

En el Mioceno Tardío la actividad volcánica persiste y ocurre la emisión de ignimbritas medianamente soldadas y estructura tabular de dacitas-andesitas de color negro a café oscuro, marrón y naranja ocre, con abundantes líticos de roca de composición máfica a intermedia. Ocasionalmente presenta líticos angulosos de pómx de color naranja y café claro. La secuencia está expuesta en las inmediaciones de los poblados San Francisco, La Almada y Atengo. Está cubierta discordantemente por un paquete de rocas piroclásticas de composición riolítica conformado por oleadas, depósitos de caída libre de composición intermedia, depósitos de ceniza, horizontes arenosos y esporádicos depósitos de grava y arena que rellenan paleocanales; secuencia que ha sido erróneamente agrupada como Toba Donguinyó o Toba San Francisco. En el Plioceno Temprano continúa la actividad volcánica explosiva representada por la formación y evolución de las calderas de Amealco y Huichapan, que expulsaron grandes volúmenes de ignimbritas de composición andesítica y riolítica, respectivamente. El conjunto litológico representado por riolitas, tobas riolíticas y tobas dacíticas del Plioceno, está formado por riolitas e ignimbritas distribuidas principalmente al sureste del acuífero; que incluyen distintas unidades, destacando, por su amplia distribución, la Toba Amealco, representada por una secuencia piroclástica de hasta 100 metros de espesor que incluye ignimbritas consolidadas e intercaladas con depósitos de lapilli de caída libre; cuyos afloramientos se observan principalmente en las

comunidades Pedro Escobedo, El Sauz, La Lira, La Estancia y en las cercanías de San Juan del Río.

Consideradas por diferentes autores como vulcanismo post-caldera, se identificaron rocas de composición máfica e intermedia que cubren discordantemente a paquetes ignimbríticos y depósitos de tefra, conformadas por andesitas y basaltos-andesitas del Plioceno Tardío. Al oriente y sur de San Juan del Río y sur del ejido Ajuchitlancito se observan afloramientos de andesitas y basaltos con alto grado de fracturamiento, sobreyacidos por basaltos de edad Cuaternario. En el Cuaternario los productos piroclásticos son predominantemente de composición félsica, contemporáneos a depósitos lacustres, que cubren de forma indistinta a las unidades de roca preexistentes. Los delgados y aislados remanentes de arenas, limos y gravas, tienen un espesor muy pequeño y de escasa extensión que no son cartografiables a esta escala (Carta Geológico-Minera San Juan del Río F14-C77. SGM, 2012. Escala 1:50,000).

#### **4.1. Estratigrafía**

En la superficie que cubre el acuífero afloran rocas volcánicas de composición variable desde ácidas, intermedias y básicas cuyas edades varían del Mioceno al Reciente (figura 2). A continuación, se describe de manera sencilla las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

### **TERCIARIO**

#### **Andesita La Virgen**

Compuesta de andesitas y andesitas basálticas de coloración gris al fresco que intemperiza a color gris pardusco claro, de textura afanítica a fanerítica. Está compuesta de fenocristales de piroxenos y plagioclasas, así como de xenolitos de composición tobácea y ocasionalmente vidrio.

#### **Basalto San Juan**

Esta unidad se caracteriza por rocas de composición basáltica de textura afanítica, que presentan coloración gris oscuro que intemperiza a gris claro pardusco; está afectada por fracturamiento columnar sin relleno secundario, y un micro-fracturamiento relleno por carbonato de calcio. La mineralogía está constituida por cristales de plagioclasas, piroxenos, ferromagnesianos alterados, biotita y olivino. Aflora en la sierra conocida con el nombre de San Juan, localizada en la porción meridional de la zona del valle, en algunas localidades cercanas a los poblados El Jazmín, Ojo de Agua, El Sabino, Buenavista, El Chaparro, Santa Lucía, Santa Bárbara, Palma de Romero, Paso de Mata, San Miguel Arcángel, El Sitio, Puerta

de Alegrías y en los cerros El Bosque, El Jimbo, La Caja, El Barral, Del Aire y Cerro Gordo. Las serranías que conforman esta unidad presentan una alineación preferencial, posiblemente debido a la presencia de fallas o fracturas regionales que favorecieron su emplazamiento. Presentan fracturamiento intenso sin dirección preferencial, con relleno secundario de material arcilloso y carbonato de calcio.

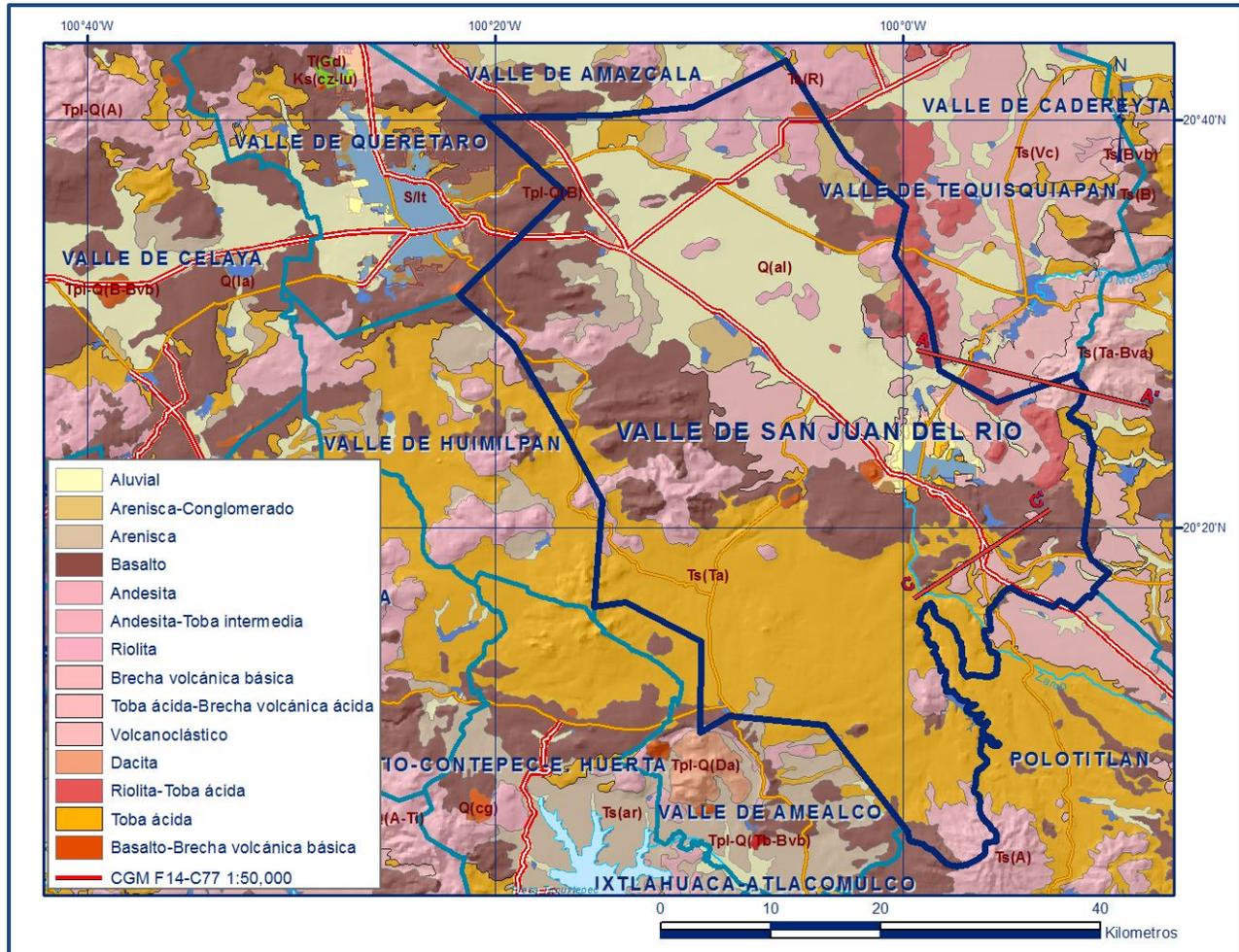


Figura 2. Geología general del acuífero

### Ignimbrita Sierra de En medio

Ignimbritas cuya mineralogía está compuesta por cuarzo, vidrio ácido, sanidino y plagioclasas; presenta como minerales accesorios ferromagnesianos alterados, minerales arcillosos y óxidos de hierro; con estructura fluidal en algunos casos con ligero ondulamiento y textura afanítica. Presentan coloración gris claro y rosado al fresco y pardo amarillento al intemperismo, con lineamiento de minerales principalmente de feldespatos potásicos. Contienen vesículas rellenas por cuarzo botroidal y en ocasiones esferulitas de sílice. Afloran en la Sierra de En medio, orientadas en sentido preferencial noreste-sureste,

en los cerros La Engorda, El Pelón, La Caja, El Zapote, La Carbonera, Garambullo y en las inmediaciones de los poblados La Pila, Puerta de En medio, Nogales, Colón, La Noria, Peñuela, La Zorra, Peña Colorada, Nueva Esperanza, El Gallo, La Palma, El Blanco, Ajuchitlán, San José de la Laja, La Laja, La Fuente, Fuentesuelas, El Carrizal, La Llave y San Nicolás.

### **Basaltos Lajeados**

Compuestos de plagioclasas, olivinos, anfíboles y ferromagnesianos, de color gris oscuro al fresco y pardo claro al intemperismo; presentan textura afanítica y microcristalina en una matriz compacta. Presentan lajeamiento y bajo grado de alteración.

### **Toba Amealco**

Con este nombre se define a una secuencia de tobas interestratificadas con ignimbritas que afloran al sur del acuífero, en la vecindad de los poblados Galindillo, Quiotillos, La Estancia de Santa Lucía y Peral. La secuencia representativa aflora en el Arroyo Zúñiga, ubicado en las inmediaciones del poblado Puerta de Alegrías, donde se observan las secuencias de tobas e ignimbritas que la componen. Son los productos efusivos de la Caldera Amealco, representados por ignimbritas de composición andesítica, depósitos tipo surge y pumicitas.

### **Toba Huichapan**

Se caracteriza por una secuencia de tobas limo-arcillosas de composición andesítica-riolítica, de coloración crema a pardo claro y crema amarillento al intemperismo, con algunos bloques de basaltos, que son producto de la Caldera Huichapan. El espesor de los estratos varía de medianos a gruesos, de 0.2 a 2 m. En la región está representada por tobas riolíticas e ignimbritas y depósitos de pómex, intercalados ocasionalmente con oleadas piroclásticas. Es posible diferenciar dos unidades litológicas, la primera por su grado de piroconsolidación e importancia económica, y la segunda en función de los usos de acuerdo a sus propiedades físicas; presentan abundante pómex de colores naranja, beige y blanco. La secuencia bien soldada presenta flammes de hasta 0.15 m, mientras que la unidad no soldada tiene pómex de tamaño hasta de 0.3 m; con líticos de andesita y basalto menores de 10 cm de diámetro, soportados en una matriz de vidrio volcánico, cuarzo y feldespatos.

## **CUATERNARIO**

### **Tobas y Andesitas**

Estas unidades están distribuidas en los amplios valles conocidos como 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 mencionados.

### **Basaltos**

Unidad integrada por basaltos y brechas volcánicas de composición básica. Los basaltos presentan coloraciones que varían de gris oscuro a negro, textura afanítica muy vesicular, cuya mineralogía se compone de plagioclasas, piroxenos, ferromagnesianos y biotita; en algunas localidades presentan fuerte lajeamiento. Sus afloramientos son reducidos, ya que se restringen a pequeños aparatos volcánicos distribuidos en la zona central, comprendida entre los poblados La Llave y Ajuchitlán, ubicados al sur y norte respectivamente. Los basaltos se encuentran aflorando en los poblados de San Antonio, al noreste de La Valla, en la mina la Trinidad, localizada al poniente del poblado La Trinidad, La Laja, al norte San Nicolás y al sur de Fuentesuelas.

### **Brechas volcánicas**

Varían en coloración de rojizo a gris oscuro, presentan textura afanítica y estructura brechoide, con algunos bloques de basalto, bombas volcánicas y fragmentos de pómx en una matriz fina; así como alto grado de alteración de los minerales ferrosos. Los aparatos volcánicos que forman esta unidad tienen una morfología de lomas redondeadas de poca altitud y pendiente. Aflora en la porción sur de San José de La Laja, y los poblados 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 en Villa Progreso.

### **Depósitos Aluviales**

Están constituidos por materiales de diversos tamaños que varían de arcillas hasta bloques redondeados de diferente composición de rocas preexistentes, con gradación de los clastos que los conforman. Se encuentran distribuidos principalmente en los cauces de arroyos, ríos y lagunas, cubriendo de manera discordante a las tobas que rellenan el extenso valle de San Juan del Río, cuya extensión se prolonga en dirección noroeste-sureste con una amplitud promedio de 12 km y al valle de Ezequiel Montes-Tequisquiapan en menor proporción. Su espesor es variable, alcanzando algunas decenas de metros.

## **4.2. Geología estructural**

En la región se observa una gran diversidad de estructuras volcánicas, producto del constante vulcanismo a que ha estado sujeta dicha región. El arreglo estructural de la zona es el resultado del tectonismo regional que provocó dislocaciones causadas por esfuerzos distensivos, que modelaron la antigua topografía, generando una nueva conformación del

terreno, mediante separación, levantamiento y hundimiento de grandes masas rocosas, en el marco de los eventos tectónicos y volcánicos que originaron el Eje Neovolcánico. A nivel regional, la estructura más importante es la falla denominada Chapala-Acambay. La zona volcánica en la que se encuentra el acuífero sufrió reactivaciones durante el Terciario Superior mediante esfuerzos compresivos que ocasionaron fallas normales orientadas en dirección oeste-este, con ligera tendencia hacia el noreste; durante este período y por medio de estas fallas regionales se extravasaron grandes volúmenes de material volcánico, que formaron aparatos volcánicos alineados con las fallas regionales. Existe otra orientación secundaria de aparatos volcánicos en dirección noreste-noroeste.

Desde el punto de vista estructural el acuífero se encuentra en la intersección de tres sistemas de fallas regionales; el sistema Taxco-San Miguel de Allende, que tiene una orientación preferencial noroeste-sureste; el sistema Chapala-Tula, con orientaciones preferentes este-oeste y noroeste-sureste; y el sistema de fallas denominado Fallas y Fosas Tectónicas, con orientación preferencial noroeste-sureste, fue el que dio origen a la fosa en la que se aloja el Valle San Juan del Río. No existen evidencias claras de deformación frágil; sin embargo mediante la interpretación del modelo digital de elevación se identificaron dos sistemas de lineamientos que corresponden a fallas normales, es decir a fases de deformación extensional durante el Cenozoico, orientados principalmente al NW-SE y E-NE y, en menor proporción, al NE-SW y N-S. Ambos se asocian a fases de deformación regionales como es el caso del sistema Taxco-San Miguel de Allende con rumbo N-NW, el Chapala-Tula orientado al E-NE, y el de Fallas y Fosas Tectónicas con dirección al NW.

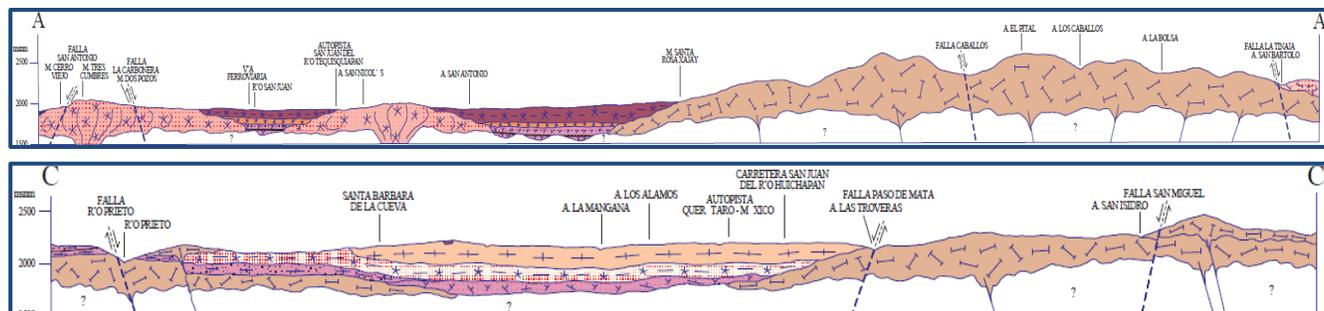
### **4.3. Geología del subsuelo**

Con base en información geológica superficial, cortes litológicos de pozos y resultados de la interpretación de sondeos geofísicos, se puede señalar que el agua subterránea se presenta en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo de bloques tectónicos escalonados de rocas volcánicas y piroclásticas, rellenas de material terrígeno de origen continental, que presenta granulometría y compactación variables.

El sistema acuífero está constituido por dos medios hidráulicamente conectados; en su porción superior, por un medio granular conformado por depósitos vulcanoclásticos, lacustres, sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados polimícticos que rellenan los valles; la porción inferior por un medio fracturado que se aloja en rocas volcánicas principalmente de composición andesítica y basáltica, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor es en general delgado, de acuerdo con la distribución

y forma de las fosas tectónicas que los contienen. Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta gran espesor y doble porosidad por su permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea (figura 3).

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento.



Fuente: Carta Geológico-Minera San Juan del Río F14-C77. Escala 1:50000, SGM, 2012

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas y geohidrológicas permiten definir la presencia de un sistema-acuífero **libre a semiconfinado**, tipo granular-fracturado, con doble porosidad, heterogéneo y anisótropo, de continuidad hidráulica regional entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcanoclásticas y depósitos terrígenos de compacidad y granulometría variables; conformado por dos medios: uno de tipo fracturado y otro de tipo granular, con interconexión hidráulica entre ellos. Está constituido, en su porción superior, por sedimentos vulcanoclásticos y sedimentos aluviales de espesor delgado, y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas principalmente de composición andesítica y basáltica. De manera local, la presencia de sedimentos lacustres y piroclásticos muy finos pueden ocasionar condiciones de semiconfinamiento.

El medio volcánico fracturado presenta gran espesor, con marcadas propiedades heterogéneas y anisotrópicas debido al patrón y grado de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea. El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas y pilares tectónicos.

## **5.2. Parámetros hidráulicos**

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos, se tomaron en cuenta las pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación realizadas en estudios previos en este acuífero y otros vecinos como Valle de Querétaro, Valle de Tequisquiapan, Valle de Amealco, Polotitlán y Huichapan-Tecoautla, que tienen la misma constitución, origen y evolución geológica. De los resultados de la interpretación estas pruebas por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad en el rango comprendido entre  **$8.5 \times 10^{-6}$  a  $74.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (0.7 a 6393.6  $\text{m}^2/\text{d}$ )**, en tanto que la conductividad hidráulica presenta valores entre  **$7.5 \times 10^{-6}$  a  $1.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (0.65 a 1.55  $\text{m/d}$ )**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que se desconoce el valor del cambio de almacenamiento y rendimiento específico. Sin embargo, por la constitución geológica del acuífero se le asigna valores promedio de coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico de 0.008 y 0.10, respectivamente.

## **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada por la Dirección Local Querétaro en la red de monitoreo geohidrológico durante el periodo 2004-2023. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2012-2023 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

## **5.4. Comportamiento hidráulico**

### **5.4.1. Profundidad al nivel estático**

La profundidad al nivel estático para el 2023 presentó valores que varían de 40 a 130 m, que de manera general se incrementan desde los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan, conforme se asciende topográficamente. Los niveles menos profundos, con valores de 40 a 50 m, se registraron en la porción oriental del acuífero, en el estrechamiento que comunica con el acuífero vecino Valle de Tequisquiapan, entre las localidades San Isidro, Santa Matilde, San Pedro Ahuacatlán y Vistha. Los valores más profundos, de 110 a 130 m, se observaron en la región norte y nororiental del acuífero, entre los poblados Lázaro Cárdenas, La Griega, La Peñuela y La Fuente (figura 4).

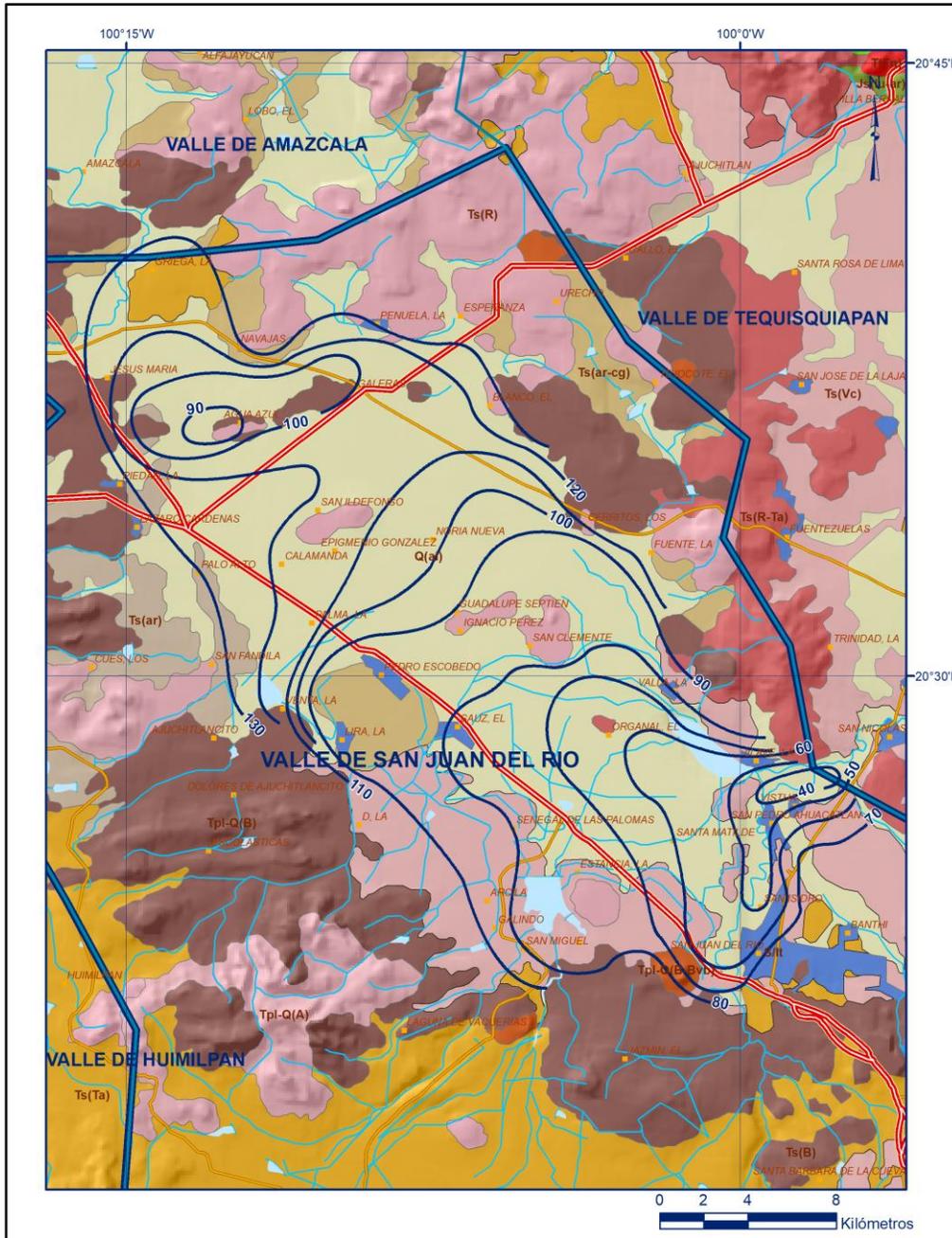


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2023)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2023 se registraron valores que variaron de 1790 a 1860 msnm, que se incrementan del extremo norte del acuífero hacia el sur y sureste, y hacia los flancos de las sierras que lo delimitan. Los valores más altos, de 1830 a 1860 msnm, se localizan en la zona suroriental, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la planicie del valle y hacia el noroeste. Las menores elevaciones, de 1800 a 1810 msnm, se

registran en la porción norte del valle, hacia el límite con el acuífero Valle de Amazcala, en donde la extracción para uso agrícola ha formado un cono piezométrico definido por la elevación 1800 msnm. La dirección preferencial del flujo subterráneo es sureste-noroeste, paralela a la dirección de escurrimiento superficial con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental (figura 5).

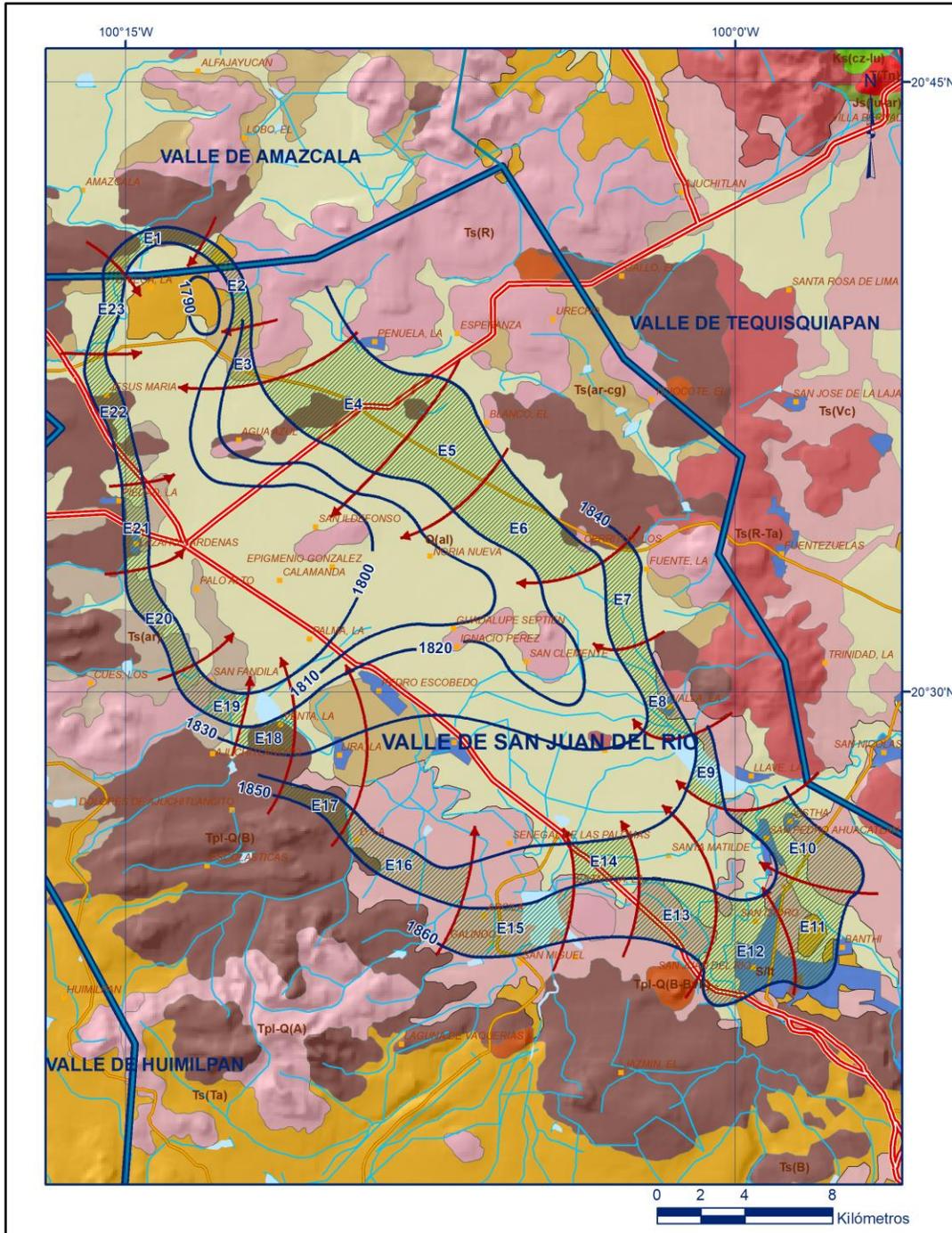


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2023)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2023 registró valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie de explotación, que varían de 1 a 10 m, con valores locales de 15 m, que representan 0.1 a 1.7 m anuales. Los mayores abatimientos, de 1.1 a 1.7 m anuales, se presentan en la poción norte y noroccidental de la zona agrícola, entre los poblados Ajuchitlancito. Palo Alto, Galeras Guadalupe Septién y Pedro Escobedo; así como en la zona norte del área urbana de San Juan del Río, disminuyendo gradualmente hacia las estribaciones de las sierras, hasta desaparecer (figura 6).

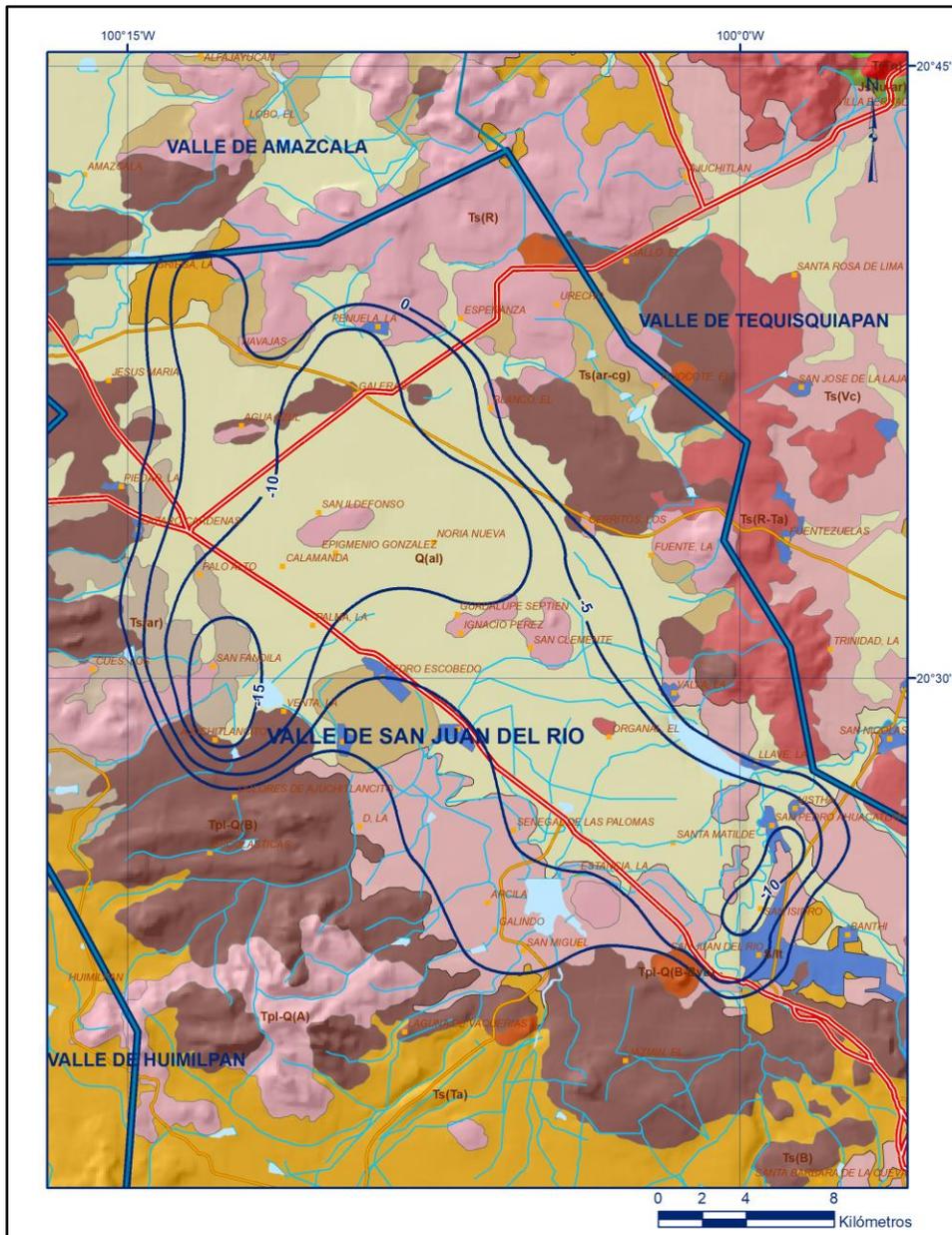


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2014-2023)

## 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018), se tomaron 10 muestras de agua subterránea del acuífero Valle de San Juan del Río en el año 2018. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos efectuados, se establece que la concentración de SDT varía de 208 a 342 mg/l, por lo que no supera el límite máximo permisible de 1000 m/l, establecido en 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. Los parámetros cuyas concentraciones superan los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la norma referida son el fluoruro y los coliformes; las concentraciones de fluoruro varían de 0.28 mg/l a 2.16 mg/l, en dos muestras de agua subterránea se rebasa el LMP de 1.5 mg/l; los coliformes fecales están presentes en una muestra de agua subterránea con una concentración de 4 NMP/100ml, mientras que el LMP indica que deberían estar ausentes.

De acuerdo con la clasificación establecida por la *American Public Health Association* (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 234 a 401  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las temperaturas del agua subterránea registradas variaron de 25.9 a 32.5 °C, en tanto que el pH varía de 7.2 a 8.2.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las familias de agua más abundantes son la bicarbonatada-sódica y la bicarbonatada-mixta, que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras de agua se clasifican como C<sub>1</sub>S<sub>1</sub>, que representa agua de salinidad baja con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, complementada con la información del REPDA 2022, se tienen registrados un total de 910 obras que aprovechan el agua subterránea; de las cuales 633 se utilizan para la agricultura, 114 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 44 para uso pecuario-doméstico, 82 para uso industrial, 30 para servicios y 7 para uso múltiple.

El volumen total de extracción calculado es de **322.5 hm<sup>3</sup>/a**, de los cuales 42.0 hm<sup>3</sup> (13.0%) se destinan al uso público-urbano, 229.6 hm<sup>3</sup> (71.2%) para uso agrícola, 25.3 hm<sup>3</sup> (7.8%) para uso industrial, 4.2 hm<sup>3</sup> (1.3%) para servicios, 19.9 hm<sup>3</sup> (6.2%) para uso pecuario y 1.5 hm<sup>3</sup> (0.5%) para uso múltiple.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

El balance de aguas subterráneas se planteó para año el periodo 2014-2023, que es el que muestra mayor cantidad de información, con la mejor distribución espacial; en una superficie aproximada de **580 km<sup>2</sup>** de la zona en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos y en la que se cuenta con información piezométrica.

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:

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

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

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

### 7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos principales,

que en conjunto se consideran como recarga vertical ( $R_v$ ), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo ( $E_h$ ).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego; del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental ( $R_i$ ).

### **7.1.1. Recarga vertical ( $R_v$ )**

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento  $\Delta V(S)$ , así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance.

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

Donde:

**$R_v$**  = Recarga vertical;

**$R_i$**  = Recarga incidental;

**$E_h$**  = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

**$B$**  = Bombeo;

**$\Delta V(S)$**  = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

### **7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ )**

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2023, mostrada en la figura 5. Con base

en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

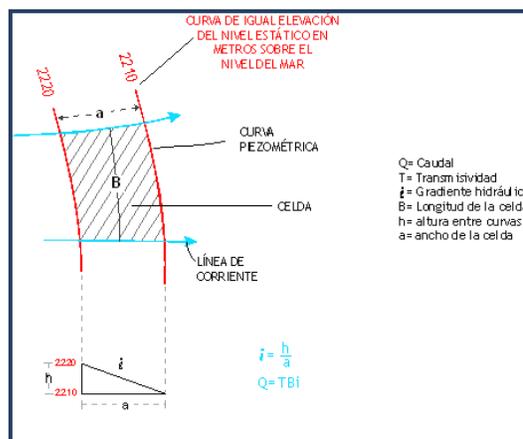
$$Q = B * i * T$$

Donde:

**B**= Largo del canal de flujo;

**i**= Gradiente hidráulico (i);

**T**= Transmisividad en el canal de flujo;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **109.1 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2023)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	4257	756	20	0.0265	0.0010	0.1126	3.6
E2	4427	671	20	0.0298	0.0008	0.1056	3.3
E3	2705	802	10	0.0125	0.0015	0.0506	1.6
E4	5371	4425	10	0.0023	0.0050	0.0607	1.9
E5	3937	3964	10	0.0025	0.0050	0.0497	1.6
E6	5731	2701	10	0.0037	0.0050	0.1061	3.3
E7	4304	1650	10	0.0061	0.0035	0.0913	2.9
E8	4552	1163	10	0.0086	0.0050	0.1957	6.2
E9	3194	1013	10	0.0099	0.0050	0.1577	5.0
E10	4877	2906	10	0.0034	0.0100	0.1678	5.3
E11	3012	3858	10	0.0026	0.0120	0.0937	3.0
E12	3443	4444	10	0.0023	0.0120	0.0930	2.9
E13	3452	2836	10	0.0035	0.0050	0.0609	1.9
E14	2716	1807	10	0.0055	0.0050	0.0752	2.4
E15	5194	2324	10	0.0043	0.0040	0.0894	2.8
E16	5960	1632	10	0.0061	0.0070	0.2556	8.1
E17	3337	979	10	0.0102	0.0080	0.2727	8.6
E18	2519	1279	10	0.0078	0.0080	0.1576	5.0
E19	3353	1300	20	0.0154	0.0030	0.1548	4.9
E20	5044	1041	20	0.0192	0.0030	0.2907	9.2
E21	3890	1067	20	0.0187	0.0020	0.1458	4.6
E22	6183	1016	20	0.0197	0.0030	0.3651	11.5
E23	4090	800	20	0.0250	0.0030	0.3068	9.7
<b>TOTAL</b>							<b>109.1</b>

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte de estudios previos realizados en este acuífero y otros vecinos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

### **7.1.3. Recarga incidental (Ri)**

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen tanto por concepto de los excedentes del riego como las infiltraciones que generan las fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o de alcantarillado de las poblaciones más importantes.

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas.

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró un coeficiente de infiltración de 10 % debido a que la profundidad media a la que se localiza del agua subterránea en la zona agrícola varía de 60 a 100 m y a la baja permeabilidad media de los sedimentos del subsuelo. El volumen de agua subterránea que se destina al uso agrícola es de 229.6 hm<sup>3</sup>; si consideramos que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de 23.0 hm<sup>3</sup>/año de los excedentes del riego.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 42.0 hm<sup>3</sup>, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y debido a que la profundidad al nivel del agua subterránea en la zona urbana de San Juan del Río es en promedio de 60 m, un 5 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo es de 2.1 hm<sup>3</sup> anuales. Por lo tanto, **Ri = 25.1 hm<sup>3</sup> anuales**

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente mediante el bombeo de los pozos (B)

### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **322.5 hm<sup>3</sup>/año**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2014-2023 mostrada en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.1 se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 529.6 km<sup>2</sup>, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

**$\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado;

**A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>);

**h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m);

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de **-401.5 hm<sup>3</sup>**, que representa un promedio anual de **-44.6 hm<sup>3</sup>/año**

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2014-2023)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	$S_y$	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-10	-10.0	7.2	0.1	-7.2
-10 a -15	-12.5	125.1	0.1	-156.4
-15	-15	14.8	0.1	-22.2
0 a -5	-2.5	142.7	0.1	-35.7
-5 a -10	-7.5	239.8	0.1	-179.9
	<b>TOTAL</b>	<b>529.6</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-401.4</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>-44.6</b>

### Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= B \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 322.5 - 44.6 - 109.1 - 25.1 \\ R_v &= 143.7 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 143.7 + 109.1 + 25.1 \\ R &= 277.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso, su valor es de **277.9 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 252.8 hm<sup>3</sup> corresponden a la recarga natural y 25.1 hm<sup>3</sup> a recarga incidental.

## **8.2. Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero Valle de San Juan del Río, no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 hm<sup>3</sup> 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 (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **334'792,701 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

## **8.4. Disponibilidad 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{A} &= 277.9 - 0.0 - 334.792701 \\ \text{DMA} &= - 56.892701 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe disponibilidad de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario, su **déficit** es de **56'892,701 m<sup>3</sup>**.

## **9. BIBLIOGRAFIA**

Comisión Nacional de Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas 1991. Estudio prioritario del estado de Querétaro.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de San Juan del Río, estado de Querétaro.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Querétaro, 2013. Estudio geohidrológico en el valle de Querétaro, en el estado de Querétaro. Realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias Unidad Juriquilla.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Querétaro, 2023. Información piezométrica, del acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro

Secretaría de Agricultura Recursos Hidráulicos (SARH), Representación General en el estado de Querétaro, 1981. Estudio geohidrológico de los valles San Juan del Río, Querétaro y zonas de Tequisquiapan, Amazcala, Colón y Ezequiel Montes, estado de Querétaro.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1970. Estudio geohidrológico de los valles de Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan, en el estado de Querétaro. Realizado por Ingeniería y Sistemas, S.A. (INSISA).

Servicio Geológico Mexicano, 2012. Carta Geológico-Minera San Juan del Río F14-C77. Escala 1:50,000