



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN NICOLÁS TOLENTINO (2416),  
ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>6</b>
3.1. Provincia fisiográfica.....	6
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía .....	8
3.4. Geomorfología.....	9
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>9</b>
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología estructural .....	22
4.3. Geología del subsuelo .....	23
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>24</b>
5.1. Tipo de acuífero .....	24
5.2. Parámetros hidráulicos.....	24
5.3. Piezometría .....	24
5.4. Comportamiento hidráulico.....	24
5.4.1. Profundidad al nivel estático .....	24
5.4.2. Elevación del nivel estático .....	25
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	26
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	27
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>27</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>28</b>
7.1. Entradas .....	28
7.1.1. Recarga vertical (Rv) .....	28
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	29
7.1.3. Retornos de riego (Rr).....	30
7.2. Salidas.....	30
7.2.1. Extracción por bombeo (B) .....	31
7.2.2. Evapotranspiración (ETR) .....	31
7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	32
7.2.4. Descarga por manantiales (Dm).....	33
7.3. Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	33
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>34</b>
8.1. Recarga total media anual (R).....	34
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	34
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	34
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	35

## **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**

Localización El acuífero San Nicolás Tolentino definido con la clave 2416 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro sur del estado de San Luis Potosí, entre las coordenadas geográficas 21° 53' y 22° 20' de latitud norte y 100° 11' y 100° 44' de longitud Oeste, cubriendo una superficie de 1,696 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el acuífero Villa Hidalgo, al este con los acuíferos Cerritos-Villa Juárez y Río Verde, al sur con Santa María del Río y al oeste con el acuífero San Luis Potosí, todos ellos pertenecientes al estado de San Luis Potosí (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero.

ACUIFERO 2416 SAN NICOLAS TOLENTINO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	100	18	34.6	21	55	20.9
2	100	19	17.0	21	52	35.1
3	100	24	1.1	21	54	40.1
4	100	27	10.7	21	53	43.9
5	100	34	30.7	21	54	35.3
6	100	37	15.7	21	59	57.9
7	100	40	12.7	22	1	26.8
8	100	43	18.3	22	12	35.2
9	100	43	22.0	22	14	8.9
10	100	40	37.8	22	14	58.8
11	100	30	27.4	22	16	37.7
12	100	28	36.8	22	17	36.3
13	100	27	24.9	22	19	15.1
14	100	26	6.3	22	19	22.7
15	100	25	33.6	22	17	15.7
16	100	22	49.0	22	15	36.0
17	100	19	32.3	22	8	38.7
18	100	14	18.2	22	5	32.5
19	100	12	7.0	22	4	33.8
20	100	12	30.9	21	58	15.2
21	100	11	4.5	21	56	16.1
22	100	13	41.3	21	52	48.9
1	100	18	34.6	21	55	20.9

Geopolíticamente abarca la totalidad o gran parte de los municipios San Nicolás Tolentino y Ciudad Fernández, algunas porciones de los municipios Armadillo de Los Infante, Zaragoza y Río Verde y pequeñas porciones de los municipios Cerritos, Cerro de San Pedro y Santa María del Río.

## **1.2. Situación administrativa del acuífero**

El acuífero San Nicolás Tolentino pertenece al Organismo de Cuenca IX “Golfo Norte”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local San Luis Potosí. La porción este del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el municipio de Río Verde, en el estado de San Luis Potosí”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 9 de julio de 1966. Esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El segundo es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en el área que ocupa los límites geopolíticos del municipio de Ciudad Fernández S.L.P., para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo de dicha zona y se establece veda por tiempo indefinido”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 29 de abril de 1981, esta veda es de tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

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

El usuario principal del agua es el sector agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

Dentro de los límites del acuífero en la porción oeste se localiza la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Sierra de Álvarez”, con fecha de decreto 7 de abril de 1981. En la porción sur se localiza el Parque Nacional “El Potosí”, con fecha de creación el 15 de septiembre de 1936.

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

El número de estudios disponibles relacionados con los recursos hídricos de la región y zonas aledañas es muy reducido, sobre todo en lo que respecta al estudio de las aguas subterráneas, a continuación, se mencionan los más importantes:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA REGIÓN NORTE DE SAN NICOLÁS TOLENTINO, S.L.P., FOLLETO TÉCNICO NO. 51. Elaborado por el instituto de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en 1965.** Es uno de los primeros trabajos realizados que incluye la zona ya que abarca un área de 8,000 km<sup>2</sup> en la zona del acuífero, Su objetivo fue el de conocer el número de aprovechamientos y la calidad del agua, obteniéndose datos de niveles estáticos, de calidad de agua, así como de los afloramientos geológicos que ayudaron a tener un conocimiento de del origen de las aguas subterráneas de la región.

**CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA HOJA SANTA CATARINA. Folleto Técnico No. 61 del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en 1978.** Se reporta la cartografía geológica de toda la carta Santa Catarina. La estratigrafía involucra formaciones marinas cretácicas de cuenca (La Peña y Cuesta del Cura) de edad Aptiano-Cenomaniano, y de plataforma (formaciones Guaxcamá, El Doctor, Soyatal y Cárdenas) de edad Neocomiano al Maestrichtiano, ambas secuencias están plegadas y forman sierras importantes como las de Álvarez y Trejo. }

En discordancia sobre la secuencia marina plegada están importantes depósitos conglomeráticos continentales y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno. Lahares, sedimentos continentales y rocas volcánicas (lavas, depósitos de escoria y otros depósitos piroclásticos asociados al desarrollo de un cráter de explosión) de edad pliocuaternaria completan la secuencia aflorante en la carta.

**ESTUDIO HIDROLÓGICO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ. Publicación del Gobierno del Estado y el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en 2001.** Concluye que la zona es un valle intermontano, con un acuífero del tipo libre, con condición de sobreexplotado y que no lo afecta ningún tipo de veda, con un total de 120 aprovechamientos con profundidades al nivel estático de 6 a 20 m, la calidad del agua varía de dulce a salada predominando la familia cálcico-bicarbonatada, la recarga proviene principalmente de los escurrimientos de las partes altas que la rodean la cual no se ha podido cuantificar.

**ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO SAN NICOLÁS TOLENTINO EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ. Elaborado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para la Comisión Nacional del Agua, en 2010.**

Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

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

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia fisiográfica**

La superficie cubierta por el acuífero se localiza en su totalidad en la provincia fisiográfica V Sierra Madre Oriental (INEGI, 2002) la cual abarca desde la frontera norte del país hasta la provincia del Eje Neovolcánico, en las inmediaciones de Pachuca, Hidalgo.

Tiene una orientación preferencial paralela a la costa del Golfo de México, pero a la altura de Monterrey, N. L., una parte de ella cambia su dirección hacia el oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental, al norte de Cuencamé, Durango. Comprende parte de los estados San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz.

La Sierra Madre Oriental es una cordillera cuyo relieve se relaciona con la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, que fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste formando pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide. A lo largo del frente de este cinturón se distinguen varios sectores que tienen variantes internas en el estilo y orientación de deformación. En general, las altitudes de las cumbres de la Sierra Madre Oriental quedan comprendidas entre los 2,000 y 3,000 m, pero su parte más elevada, entre Saltillo y Ciudad Victoria, alcanza alturas superiores a 3,000 msnm.

La porción sur del acuífero se encuentra dentro de la Subprovincia denominada Carso Huasteco, esta región cárstica es una de las más extensas del país, en ella dominan rocas calizas que al ser disueltas por el agua originan rasgos de dolinas y grutas.

La porción norte del acuífero pertenece a la Subprovincia Sierra y Llanuras Occidentales, constituida por sierras predominantemente de rocas calizas, orientadas norte-sur y generalmente unidas entre sí por un conjunto de cerros menores, que tienen esa misma orientación.

La Sierra de Catorce, al pie de la cual está ubicada la ciudad de Matehuala, define el límite occidental de la subprovincia y es la de mayor importancia y magnitud. En la porción Potosina de esta subprovincia dominan las sierras y llanuras, pero también hay algunos lomeríos, bajadas y valles.

Los sistemas montañosos más relevantes corresponden a la sierra de Álvarez localizada en la porción suroccidental, prolongándose fuera del área y la sierra Trejo que destaca en la porción central. La máxima elevación se tiene al poniente de la ranchería Álvarez, alcanzando los 2,700 msnm, seguida por el cerro Los Caballos con 2,660 msnm, ambas localizadas en la sierra de Álvarez, en contraste la mínima cota que se registra es la de 1,100 msnm, en el lecho del río Santa Catarina, por lo que se tiene un desnivel máximo de 1,600 m. En las partes más altas de los cerros mencionados existen dolinas y sumideros que les dan un aspecto cárstico. Algunas cárcavas notables por su forma "encastelada" existen en las inmediaciones de paso del águila y sobre las márgenes del arroyo del Xoconoxtle.

Otras cárcavas muy profundas se observan cerca del Potrero de Santa Gertrudis, por el camino a Buenavista. El río San Nicolás y sus principales afluentes, exhiben cortes profundamente labrados que, en algunos casos, alcanzan alturas de 25 m sobre el lecho de los cauces, las estrechas y pequeñas planicies aluviales se encuentran en las inmediaciones del Jagüey, lugar donde se encuentra una gran dolina en cuyo fondo aflora agua subterránea. Todo este conjunto fisiográfico se sitúa en la parte media de la unión de la Sierra de Álvarez con la Sierra de Guadalcázar.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, el clima en la región norte es seco estepario (Bsh) y al sur semiseco templado (BS1k). Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de las estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **599.3 mm** y **18.5 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1863 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos periodos de ocurrencia, uno en verano de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos y otro de noviembre a abril, con precipitaciones menos significativas. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura, los valores más altos comprenden de marzo a octubre, mientras que los más bajos de noviembre a febrero. Los vientos dominantes son de sureste a noreste.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 26 Pánuco, cuenca del río Tamuín. Esta región esta considerada como una de las cinco regiones hidrológicas más importantes del país, tanto por el volumen de sus escurrimientos como por la superficie que ocupa. La Cuenca del Río Tamuín nace en el estado de San Luis Potosí, en las inmediaciones del poblado de Tamuín, las subcuencas intermedias son Río Puerco, Río Mesilla y Río de Los Naranjos. Los principales cauces son el Río San Nicolás que cruza en sentido noroeste a sureste el área y se une más abajo con el Río Santa Catarina para posteriormente iniciar el Río Verde; además se unen a estos los arroyos: San Martín de Abajo, El Arrastradero, Los Timones, El Infinito, Arroyo Grande y Peña Prieta.

Así mismo cuenta con los manantiales el Jagüey, de los Castillo y no menos importantes Paso del Águila, Ojo de Agua, Armadillo y la Presa de las Golondrinas que aprovecha los escurrimientos de estos arroyos.

El drenaje es del tipo dendrítico y rectangular definido por la geología del terreno, con pendientes muy fuertes reguladas por la topografía y con una densidad muy alta, donde los ríos principales confluyen en el San Nicolás en dirección desde el noreste al sureste.

### **3.4. Geomorfología**

La geomorfología de la zona que cubre el acuífero es muy variada, se caracteriza principalmente por el desarrollo de altas montañas formadas por calizas y pedernal, con intercalaciones de lutitas fuertemente plegadas y lomas y sierras formadas también por calizas con plegamiento suave y algunas cabalgaduras. Son abundantes las estructuras cársticas de colapso ("dolinas") sobre todo en la Sierra de Trejo, al sur de Llanos de Saldaña e inmediaciones de Puerto La Huerta.

El relieve también presenta montañas en bloques de relieve discreto, formado por lavas andesítico-basáltico y dacitas e ignimbritas intercaladas, que presenta un escarpe fuerte del lado fallado y pendiente suave hacia donde se bascula y domos riolíticos y dacíticos ampliamente dispersos, con mayor distribución en la parte sur, en general sus pendientes son escarpadas.

Los arroyos de las sierras que las rodean confluyen hacia las planicies aluviales, las tres planicies mayores están interconectadas por los dos ríos principales que drenan el área que ocupa el acuífero (Ríos Santa Catarina y San Nicolás).

Su distribución es más o menos continua. Esos ríos al cruzar las planicies más elevadas drenan hacia la de menor nivel y se juntan para formar un cause único que más adelante recibirá el nombre de Rio Verde.

En la zona existen también conos volcánicos de tobas desarrollados por hidrovulcanismo, que están hacia las inmediaciones de Potrero de Santo Domingo, rotos en su parte sur. La naturaleza extendida de lavas andesíticas basálticas, ignimbritas y lavas dacíticas muy fluidas forman una meseta volcánica que por fallamiento presenta un fuerte escarpe en el lado fallado y pendiente suave.

## **4. GEOLOGÍA**

Geológicamente el acuífero se ubica en la porción centro-occidental de la plataforma cretácica Valles-San Luis Potosí, definida por Carrillo B. J. (1971). Dicha plataforma es un elemento paleogeográfico positivo, constituido por rocas precámbricas, paleozoicas y triásicas, plegadas y falladas, que fue parcialmente cubierta por el mar en el Jurásico inferior, depositando secuencias siliciclásticas (figura 2).

La plataforma fue totalmente cubierta para el Aptiano y sobre ella se depositaron primero evaporitas y después calizas de mar somero, alcanzando su máximo desarrollo en el Cretácico medio, durante el Albiano-Cenomaniano.

El desarrollo que mostró esta plataforma aislada a partir del Aptiano y durante el Albiano-Cenomaniano en su margen occidental, fue el de una progradación del margen hacia el oeste, con un piso marino de baja pendiente tipo rampa.

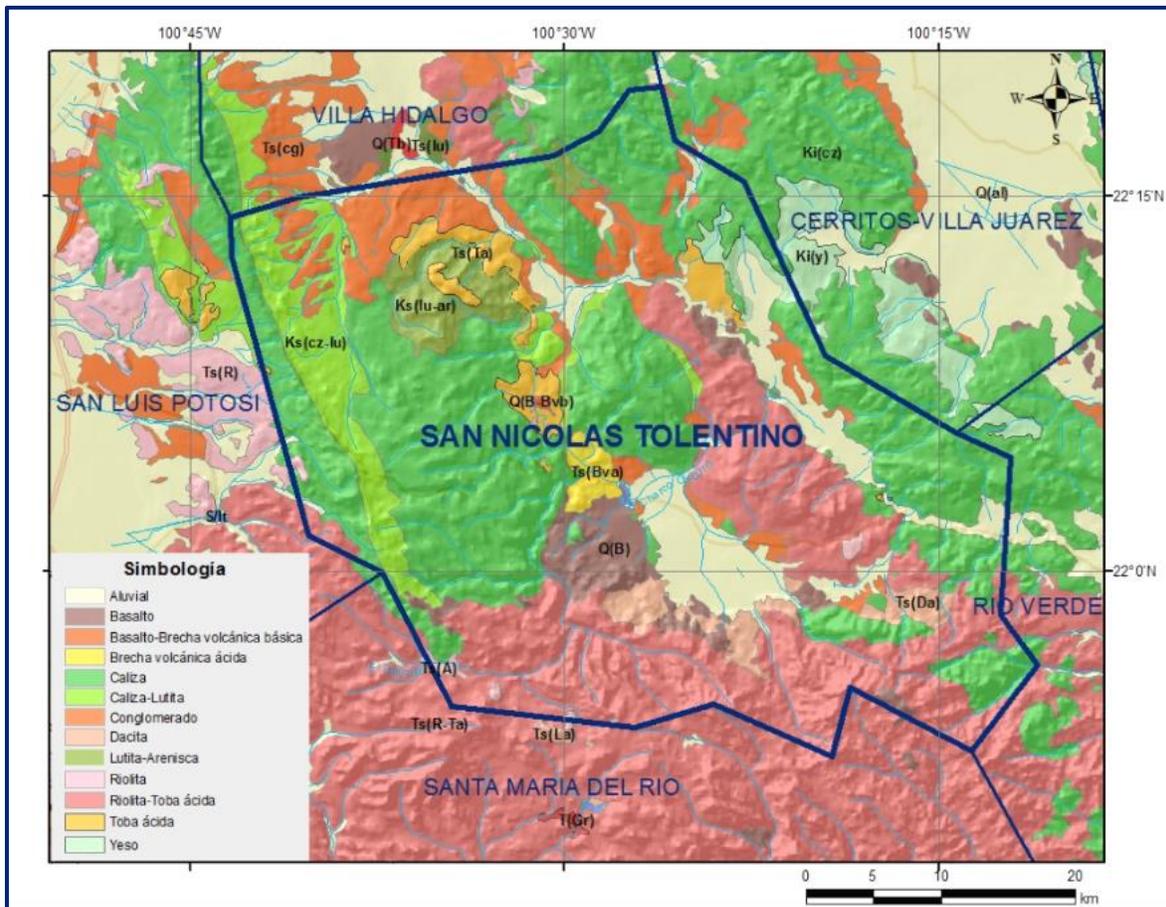


Figura 2. Geología general del acuífero

En el Cretácico Tardío el aporte de terrígenos finos provenientes del oeste modificó la sedimentación primeramente en la cuenca mesozoica del centro de México (caliza margosa, marga, limolita y lutita) y posteriormente influenció el régimen sedimentario en la plataforma Valles-San Luis Potosí, provocando una retrogradación del margen de la plataforma y con ello un desplazamiento hacia el este de las facies de talud, margen y laguna interior, así como una variación gradual en los sedimentos depositados. Durante el Oligoceno se produjo un evento de vulcanismo bimodal a los ~27 Ma, y otro en el Mioceno, entre los 20 y 21 Ma.

Los valles intermontanos donde se encuentran la mayoría de las obras (pozos y norias), están rellenos de sedimentos lacustres oligomiocénicos y pliocuaternarios, separados unos de otros por una discordancia erosional. El último evento volcánico en la región, ocurrió en el Pleistoceno y consistió en la emisión de basalto, que generaron derrames de lava, conos de escoria y eventos hidrovulcánicos, los cuales regionalmente formaron cráteres de explosión (Joya Honda, La Joyuela) y conos de tobas (Laguna de los Palau) durante el Plio-Pleistoceno.

La erosión y denudación de las estructuras topográficamente elevadas está generando un importante volumen de sedimentos gruesos a finos, los cuales se están depositando en las márgenes de las sierras (coluviones) y relleno de las depresiones tectónicas e intermontanas de toda la zona del acuífero.

#### **4.1. Estratigrafía**

La estratigrafía del área del acuífero comprende unidades sedimentarias y volcánicas. Las rocas más antiguas corresponden a sedimentos evaporíticos del Cretácico inferior (Aptiano) y las más jóvenes, son derrames basálticos del Cuaternario. En ambos casos están cubiertas por sedimentos (aluviones y coluviones) gruesos a finos. A continuación, se describen brevemente cada una de las unidades litoestratigráficas:

##### **Yeso-Anhidrita (Knap Y-Ah)**

###### **Formación Guaxcamá**

Regionalmente aflora solo en el sector noreste, en el núcleo del anticlinal El Potrero. Litológicamente se compone de capas medias (de 0.30 a 0.60 m de espesor) a delgadas (0.05 a 0.10 m de espesor) y ocasionalmente gruesas, (más de 1 m), de yeso blanco lechoso, frecuentemente laminado y con intercalaciones de capas de anhidrita parcialmente hidratada.

También presenta intercaladas capas medias de dolomías, de color gris oscuro, textura granular (sacaroides), sin macrofauna y finamente laminadas. La secuencia está fuertemente deformada, mostrando abundantes pliegues desde homoclinales hasta disarmónicos fuertemente apretados. La base de la Formación Guaxcamá no aflora y subyace concordantemente (?) a la Formación El Abra. La edad de esta formación, con base en su posición estratigráfica es Aptiano.

### **Caliza-Lutita (Kap Cz-Lu)**

**Formación La Peña.** Esta unidad aflora en la parte occidental del área, estando bien expuesta en el flanco oeste de la sierra de Álvarez. Está constituida por caliza criptocristalina a microcristalina de color gris claro a rojizo, de estratificación media a gruesa, con nódulos y lentes de pedernal negro, y algunos cristales de sulfuros parcialmente oxidados.

Los estratos más gruesos son de naturaleza turbidítica y aisladamente se llegan a observar algunas brechas calcáreas oligomícticas. Alterna con lutita y lutita calcáreas de color rojizo, amarillento y violáceo, en capas delgadas a medias. Se presenta fuertemente plegada con pliegues apretados y recostados al NE.

Su espesor es difícil de estimar porque está intensamente plegada, pero se estima que es superior a los 300 m. Estratigráficamente subyace a la Formación Tamabra (Kass Cz-Bro), a la cual pasa transicionalmente. La probable edad de esta formación es Aptiano Superior. Sus características sugieren que su depósito ocurrió en un ambiente profundo de pie de talud que bordeaba la plataforma.

### **Caliza (Kass Cz)**

**Formación El Abra.** Aflora extensamente en las porciones centro y oriental, representando la secuencia sedimentaria más importante en el área que cubre el acuífero. Litológicamente está formada por una secuencia de estratos de caliza, de espesor medio, grueso a masivo, de color gris claro a oscuro. Comúnmente presenta huellas de kársticidad.

En algunas partes se presenta localmente dolomitizada, lo cual se distingue por su aspecto sacaroide, un tono de gris más oscuro que los estratos normales de la caliza, y porque desprende un olor fétido al golpe del martillo.

En el área que ocupa el acuífero esta unidad muestra facies pre arrecife, arrecife y post arrecife (lagunar), encontrándose capas con texturas que van desde mudstone, packstone / grainstone, hasta floatstone y rudstone. En general esta secuencia es rica en micro y macrofauna de aguas someras, destacándose la presencia de foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas). La macrofauna corresponde a rudistas, equinodermos y gasterópodos, aisladamente se llegan a observar corales y algas. El espesor de esta secuencia es muy variable. Sobreyace concordantemente a la Formación Guaxcamá y subyace concordantemente a la secuencia de caliza-lutita

de la Formación Soyatal y/o a lutita-areniscas de la Formación Cárdenas. De manera general, se ha considerado la edad de la Formación El Abra como Albiano-Cenomaniano.

### **Caliza-Lutita (Ktss Cz-Lu)**

**Formación Soyatal.** Aflora en solo en la parte occidental del área que ocupa el acuífero, donde está ampliamente distribuida. En la base predomina la parte calcárea sobre la arcillosa y en la cima predominan las arcillas.

En donde la secuencia es más gruesa esta Formación fue dividida en dos miembros; el inferior formado por caliza arcillosa y carbonosa y limolita de color gris oscuro a negro, las cuales se presentan en estratos delgados a medianos, con algunas intercalaciones de lutitas fósiles.

El superior consiste de una alternancia de lutita fósil de color gris verdoso que intemperizan en amarillo ocre, con caliza arcillosa de color gris oscuro a negro.

Aisladamente contiene algunos estratos de calcarenita de color gris oscuro a verdoso. Se estimó su espesor en 224 m para esta secuencia, al este de la sierra de Álvarez. Sobreyace transicionalmente a las formaciones Tamabra y El Abra, y subyace de la misma manera a la Formación Cárdenas; lateralmente hacia la cuenca mesozoica del Centro de México pasa de manera transicional a la Formación Indidura, con la que comúnmente se le correlaciona.

Por su posición estratigráfica la edad estimada para esta formación es Turoniano-Santoniano. Por su litología se interpreta que se depositó en un medio marino de aguas poco profundas de transición cuenca-plataforma.

### **Lutita-Arenisca (Kcm Lu-Ar)**

**Formación Cárdenas.** Esta unidad aflora sobre todo en las porciones occidental y noroccidental, en el valle intermontano que se localiza entre las sierras de Álvarez y El Durazno, y en inmediaciones del Picacho de Los Dolores. Otros afloramientos más restringidos se encuentran en el extremo norte de la sierra de Trejo y en la parte oeste del anticlinal El Pinto.

La litología consta de capas delgadas y medias de arenisca rojiza a ocre y café oscura, en horizontes medios a finos.

La arenisca es impura, pobremente clasificada, cuyos granos se componen en un 90% de líticos y el resto de cuarzo y feldespato de formas angulosas a sub-redondeadas, los cuales descansan en una matriz calcáreo-arcillosa (“grauvacas”). Rítmicamente las capas areníticas gradúan a limolita y de estas a lutita y lutita calcárea.

Cuando el porcentaje de micrita aumenta, se reconocen algunas capas intercaladas de marga. La secuencia en general muestra series repetitivas con gradación normal lo que produce una litología típica de arenisca media, fina, limolita y lutita en forma de depósitos tipo flysch, aunque en general la tendencia es a aumentar el contenido arcilloso de la secuencia con lo que para su parte superior la litología se limita casi exclusivamente a lutita y limolita.

En la porción centro occidental de se estimó un espesor mínimo de 180 m. Descansa concordantemente sobre la Formación Soyatal al oriente de la sierra de Álvarez, y sobre la Formación El Abra al oeste de sierra El Pinto, en las cercanías del poblado El Alguacil.

La cima de ésta formación dentro del área no aflora, principalmente por encontrarse tectonizada, erosionada o cubierta discordantemente por depósitos continentales del paleógeno-neógeno o plio-cuaternarios. Por su contenido faunístico y por posición estratigráfica, se le asigna una edad Campaniano –Maestrichtiano.

**Rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno.** Las rocas volcánicas que se reconocieron en el área del acuífero, son lavas de composición andesítica, dacítica y/o riolítica-dacítica, intercaladas con una ignimbrita. La unidad volcánica inferior es una riolita-dacita. Sobre ella se presenta una secuencia gruesa de lavas andesíticas afaníticas a porfídicas de color gris oscuro.

La andesita está cubierta por un extenso manto de ignimbrita. En algunos lugares la ignimbrita cubre discordantemente a la secuencia marina mesozoica o a depósitos clásticos del Eoceno. Una serie de derrames de lavas traquíticas, riolíticas y dacíticas, que forman domos semi-planos (cerros Huirico, El Mesquite, Mesa Alta, Picacho Alto y Golondrinas) cubren a la ignimbrita y a la andesita. Depósitos de avalancha derivados del colapso de un sector del estratovolcán de Atotonilco predominan en la parte sur del área.

**Riolita – Dacita (To R-Da).** Está distribuida en la porción sureste del área que ocupa el acuífero en afloramientos pequeños, de menos de 3 km<sup>2</sup>, algunos de los cuales continúan hacia el oriente. Estos derrames contienen de 10 a 15% de fenocristales de sanidino, plagioclasa y cuarzo, presenta ferromagnesianos pequeños que por oxidación, al intemperizar la roca, le dan una coloración café claro a rojizo. No aflora su base, pero seguramente sobreyace a rocas marinas cretácicas de Formación El Abra, subyace a una secuencia de derrames andesíticos. Dado que subyace y que probablemente en algunas porciones se interdigita con la unidad de andesita-basalto, se le asigna una edad Oligoceno Medio. Estas lavas se extravasaron a través de fracturas que delimitaron depresiones intermontanas.

**Andesita-Basalto (To A-B).** Esta secuencia de lavas no ha sido descrita formalmente y representa junto con la unidad anterior las rocas volcánicas más antiguas que afloran en el área. Afloran principalmente en las porciones centro y oriental, aunque también se llegan a observar en pequeños afloramientos dispersos, fuera de estas porciones.

Los mayores espesores se observan entre las rancherías Potrerito de Los Castillo y Ojo de Agua de San Juan, donde tiene más de 140 m de espesor. La base de esta unidad está bien expuesta al norte de Potrerillo de Los Castillo. Consiste de una secuencia de derrames de lava de color gris oscuro a verdoso, muy fluidal, densa, bien compacta, de textura porfirítica y pilotaxítica, contiene alrededor de 5% de fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica.

Localmente llega a ser vesicular. Otro paquete grueso de lava con 10% o más de cristales se presenta entre los poblados de San Martín de Abajo y Nogalitos. En algunos derrames la andesita-basalto tiene textura escoriacia. Dentro de esta unidad, se identificaron diques aislados, de 2 a 3 m de espesor, no cartografiados a la escala utilizada.

Sobreyace discordantemente a las secuencias sedimentarias mesozoicas y a su vez subyace a la ignimbrita del Oligoceno Medio. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad Oligoceno Medio. Los derrames de lava fluyeron a partir de diques y centros puntuales de emisión sobre todo tipo de topografía, pero se acumularon de manera preferente en depresiones y valles intermontanos.

**Ignimbrita (To Ig).** Los afloramientos de esta unidad se localizan en las porciones centro-norte, central y oriental del área formando extensos mantos. Consiste de una roca de color gris claro que por intemperismo adquiere color rosado.

Su textura es porfírica y eutaxítica, con presencia de fenocristales de cuarzo y feldespatos (sanidino). Está en general bien soldada, la matriz es vítrea y está parcialmente devitrificada. La base presenta un delgado vitrificado de color negro a gris oscuro, que al alterarse se hace muy deleznable o adquiere tonalidades rojizas. La parte superior presenta estructura columnar.

El espesor de esta unidad en el cerro El Picacho (al norte de la ranchería Ojo de Agua de San Juan), es de más de 120 m. Sobreyace discordantemente a las unidades marinas del Cretácico, a la andesita y a los clásticos continentales oligocénicos. La cubren también discordantemente, lavas de composición riolítica-dacítica de la unidad denominada informalmente Latita Portezuelo y clásticos continentales.

**Latita (To Tq).** Aflora principalmente en la parte este y suroeste del área que ocupa el acuífero, formando estructuras dómicas, como puede observarse en los cerros El Huirico, El Nogal y El Mesquite, entre otros.

Los afloramientos que se encuentran en la parte oriental, contiene un 10% de fenocristales y en general son más fluidas (los derrames generaron domos semiplanos), que las que afloran en la esquina suroeste, donde presentan mayor contenido de fenocristales 15 a 30%, los cuales corresponden a sanidino, plagioclasa, cuarzo subordinado y ferromagnesianos. La oxidación de los ferromagnesianos le da una apariencia y color rojizo muy característico. Algunos de los cristales de plagioclasa presentan 2 y hasta 3 coronas de reacción. Su espesor es muy variable, siendo el máximo de 260 m, cerca de la esquina suroeste del área del acuífero.

**Brecha andesítica-brecha dacítica (To BvA-BvDa).** Se distribuyen en la parte central-sur de la carta, en las inmediaciones del poblado Santa Catarina, extendiéndose hacia las rancherías Paso de San Antonio y Ojo de Agua de San Juan. Al sur del poblado Santa Catarina, estos depósitos de avalancha de escombros, presentan una morfología de montículos y facies de bloques, mientras que los depósitos distales que se observan en las inmediaciones de la ranchería Ojo de Agua de San Juan, presentan facies de matriz, y forman lomeríos suaves.

Las facies proximales se caracterizan por grandes bloques (decenas a centenas de metros) que presentan estructura de rompecabezas. Los mayores bloques son de andesita y dacita, aunque en algunos depósitos también se incluyen bloques de caliza, estos últimos se interpretan como material incorporado durante el emplazamiento de la avalancha.

El espesor de esta unidad es superior a 300 m, al sur del poblado Santa Catarina. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad Oligoceno Medio.

### **Paleógeno-Neógeno**

**Depósitos continentales.** Esta secuencia está dividida en tres miembros: El miembro inferior está constituido por depósitos limo-arcillo-arenosos, regularmente consolidados, semicompactos, de color pardo rojizo, aparentemente impermeable y cuyo espesor es de menos de 3 m. Un miembro intermedio (3 a 5 m de espesor) constituido por arcilla, grava y arena menos compactas que el inferior, al cual cubre discordantemente. El miembro superior constituido por material de acarreo fluvial, compuesto principalmente por grava y cantos rodados, espesor aproximado de 3 m.

### **Conglomerado polimíctico (Teo Cgp)**

**Conglomerado Cenicera.** Esta unidad aflora solo en la parte norte-central del área. Los mejores afloramientos (aunque pequeños) están en las inmediaciones de la ranchería Cañas. Se trata de una secuencia de sedimentos clásticos continentales, formada por clastos de las formaciones cretácicas (pre- volcánicos). Es una secuencia de conglomerado formado por bloques, grava, arena y arcilla. Los clastos son de caliza, marga, arenisca, lutita y pedernal negro, donde predomina la caliza. Los clastos están redondeados a sub-redondeados y mal clasificados; la matriz es arcillo-arenosa de color rojizo a anaranjado grisáceo.

En ocasiones se observan intercalaciones de horizontes con menos presencia de líticos, aunque los cambios laterales son muy rápidos. Su característica principal es que no contiene clastos de rocas volcánicas. Aunque predomina el soporte en matriz, en algunos puntos hay soporte clasto a clasto.

Son depósitos bien consolidados y parcialmente cementados. El espesor de esta formación es muy variable, pero se estima que puede alcanzar como máximo unos 35 m. Por su posición estratigráfica, se estima que su edad es posiblemente del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior.

**Lacustre (To la).** Estos sedimentos solo se observaron entre Potrerito de Los Castillo y El Carrizal de Guadalupe, y al sur de San Martín de Abajo. Su mejor afloramiento está al este de la sierra de Trejo, donde subyacen a derrames masivos de andesita. En esa parte presentan basculamiento de 40° a 20° al este. Consiste de una alternancia de depósitos lacustres de material del tamaño de arcilla, limo y arena fina a gruesa. Su color es gris claro a amarillento con diferentes tonalidades. La arena gruesa presenta estructuras de depósitos de corrientes fluviales (estratificación cruzada), gradación normal, algunos fragmentos de plantas.

Los sedimentos del tamaño de la arcilla son de color gris amarillento, presentan intercalaciones de horizontes con yeso en estructuras de ojuelas, que en los afloramientos producen un brillo especial. Donde no está cubiertos por rocas volcánicas, se pasa transicionalmente de los sedimentos sin clastos volcánicos a sedimentos con abundantes clastos de andesita, ignimbrita y en menor cantidad de dacita. Presentan algunas intercalaciones de depósitos piroclásticos delgados.

Estos depósitos en general están poco consolidados y su clasificación es regular, donde, a excepción de algunos lentes u horizontes, predomina la matriz. La parte superior está constituida principalmente por arcilla y arena. Al norte de San Martín de Abajo los depósitos se presentan basculados en promedio 20° al NE. Por su posición estratigráfica se les asigna una edad Oligoceno Inferior a Oligoceno Superior.

**Depósitos continentales fluviales (To Cgp).** Se encuentra distribuida en las inmediaciones del poblado Santa Catarina, principalmente al norponiente. Se trata de una secuencia de depósitos continentales-fluviales, consolidados, de grava y arena con estructuras de gradación, estratificación cruzada, imbricaciones y canales de erosión.

Está compuesta por clastos de rocas volcánicas y calcáreas, los cuales están sub-redondeados, semi-compactos y poco o no cementados. Su espesor generalmente es de menos de 30 m. Afloramientos bien expuestos se localizan en las márgenes de río Santa Catarina.

Por su posición cubriendo parcialmente a productos volcánicos de avalancha de escombros, de edad oligocénica, se les asigna una edad Oligoceno Superior.

**Lacustre (Tom Ia).** Aflora en las porciones centro y centro-norte del área que ocupa el acuífero, inmediatamente al norte de la ranchería Agua Zarca, y posteriormente de manera discontinua, hasta el límite con la carta adyacente Peotillos, donde continúan; su mejor afloramiento está en las inmediaciones de la cabecera municipal de San Nicolás Tolentino.

**Conglomerado polimíctico-arenisca (Tmpl Cgp-ar).** Esta unidad no ha sido definida formalmente, sin embargo, en campo tiene una clara expresión que la hace diferenciable, cubriendo en discordancia angular-erosional, a sedimentos lacustres de edad Oligoceno-Mioceno. Su mejor afloramiento está en las inmediaciones de la cabecera municipal de San Nicolás Tolentino.

Estos depósitos están formados por arcilla, arena y limo que exhiben diversas tonalidades de amarillo opaco a gris amarillento. Algunos niveles presentan horizontes con clastos del tamaño de grava, los cuales son lateralmente discontinuos. Por posición estratigráfica se les asigna una edad Oligoceno-Mioceno.

#### **Conglomerado polimíctico-arenisca (Tmpl Cgp-ar)**

Aflora en la parte central-norte del área que ocupa el acuífero, y su mejor afloramiento está en las inmediaciones del poblado San Nicolás Tolentino. Se trata de una secuencia de depósitos de arena fina, media y gruesa, con algunos horizontes de arcilla y grava intercaladas

En general este material es pobre a medianamente consolidado. El depósito consiste de clastos sub-redondeados a redondeados de caliza y en menor cantidad de arenisca y de ignimbrita del tamaño de la grava. El material está mal clasificado y la matriz es arcillo-arenosa. Esta unidad es muy importante porque marca el fin de un episodio de extensión mayor que ocurrió en la región durante el Mioceno.

El espesor es muy variable; en los mejores afloramientos tiene de 3 a 15 m de espesor. Se les asigna una edad tentativa de Mioceno Superior-Plioceno inferior por estar cubierta por sedimentos conglomeráticos que a su vez están cubiertos por basalto de edad Pleistoceno.

**Conglomerado polimíctico-grava (TplQpt Cgp-gv).** Esta unidad no ha sido descrita formalmente con anterioridad, pero ocupa un área muy extensa en esta área y áreas adyacentes. Aflora ampliamente en las porciones centro-norte y noroeste del área.

Comúnmente el conglomerado polimíctico rodea las estructuras topográficas positivas donde la litología de los clastos que los componen varían de sedimentarias carbonatadas (clastos de caliza), arcillosas (clastos de marga y lutita), a roca volcánica básica (clastos de basalto) y ácidas (clastos de riolita, ignimbrita); todos ellos descansando en una matriz arcillo-arenosa.

El espesor es muy variable dependiendo de la morfología del terreno, es de algunas decenas de metros en las cercanías de las sierras, pero se adelgaza lateralmente hasta solo unos cuantos metros en las partes más planas. Sin embargo, los depósitos más espectaculares están al sureste del poblado El Jagüey de San Francisco, donde cubren casi totalmente una loma de caliza de la Formación El Abra. Se le asigna una edad Plioceno-Pleistoceno, porque en algunos lugares (norte del poblado Armadillo de los Infante) se han encontrado huesos de mamuts que se asume representan una edad Pliocénica.

**Conglomerado polimíctico- Grava (Qpt Cgp-gv).** Los depósitos están distribuidos principalmente en la porción norte y noreste del área, entre los poblados Armadillo de los Infante y San Nicolás Tolentino, y entre la sierra de Trejo y los anticlinales El Pinto y El Potrero.

Consiste de un conjunto de sedimentos de origen fluvial medianamente a mal consolidados, de edad cuaternaria, constituidos por grava, arena gruesa a fina, limo y arcilla. Presentan mediana a nula consolidación, y lateralmente cambian sus características rápidamente. En su fracción gruesa (brecha y conglomerado) los clastos van del tamaño de bloques hasta grava y son tanto de rocas sedimentarias cretácicas (caliza, marga y lutita), como de rocas volcánicas (ignimbrita y andesita) del Terciario.

La arena y demás sedimentos finos son de la misma composición, pero más retrabajados, por lo que muestran una mayor madurez textural. En general presentan gradación normal, culminando con limo y arcilla de color amarillento a rojizo.

La fracción fina aflora superficialmente de manera más extensa. La fracción gruesa se expone de manera clara solo en las barrancas. El espesor de esta unidad es variable, desde aproximadamente 20 m en las partes más bajas, a más de 60 m en las márgenes de las sierras.

**Basalto (Qpt B).** Está distribuida de manera muy aislada al sureste de Armadillo de los Infante (al norte de Rancho Nuevo de Los Nájera y en San José de Barbosa), y al este de San Nicolás Tolentino. Se trata de lavas faneríticas y en partes vítreas de aspecto muy denso. Lateralmente estas lavas tienen aspecto brechoso por efectos de enfriamiento; las lavas que se localizan al este de San Nicolás Tolentino tienen en la base, evidencias de haber fluido sobre terreno húmedo o sobre pequeños cuerpos de agua (acaso charcas), pues su condición es vítrea, presentan fracturas o diaclasas irregulares. La superficie por donde fluyeron está requemada. El espesor máximo de esta unidad, menos de 50 m, se puede observar en San José de Barbosa.

**Brecha volcánica basáltica (Qpt BvB).** Aflora al sureste de la cabecera municipal de Armadillo de los Infante, en el lugar conocido como Laguna de Los Palau y en las inmediaciones del poblado Laguna de Santo Domingo.

Los depósitos de nube rasante están formados por material volcánico juvenil bien estratificado del tamaño de arena fina, media a gruesa. La brecha está formada por una mezcla caótica de fragmentos juveniles de rocas alcalino-básicas, de caliza y de xenolitos de granulita félsica a ultramáfica. La matriz está formada de los mismos materiales, pero finamente desmenuzados. El cementante es de carbonato de calcio. Ellos consideran a esta brecha como formada por depósitos de nubes eruptivas relacionadas con la formación del “maar”. La brecha tobácea cambia gradualmente hacia arriba a una toba eterolitológica de lapilli, que ocupa la parte superior del cráter. La unidad está bien clasificada y estratificada.

El material juvenil es basanita y abundantes xenolitos de espinela. Sobreyace a rocas marinas mesozoicas y a depósitos clásticos continentales del Plioceno al Pleistoceno. Subyace a sedimentos clásticos finos del Pleistoceno al Holoceno.

**Arena-Limo (Qptho ar-lm).** Esta unidad se presenta en depresiones intermontanas entre los poblados El Durazno y Llanos de Saldaña, y al oriente de la ranchería Paso de San Antonio. Unidad constituida por depósitos de arena, limo y arcilla, así como suelos residuales de uso agrícola en las partes topográficamente bajas. La composición de estos sedimentos varía de acuerdo a la composición de la roca madre. El espesor de estos rellenos continentales finos es variable, de 2 a 15 m, pero comúnmente es menor de 10 m.

**Aluvión (Qho al).** Se agrupa en esta unidad a depósitos aluviales que se localizan en los valles más extensos. Estos depósitos se presentan sobre todo en la parte oriental y centro-norte del área que ocupa el acuífero.

Están representados por depósitos mal consolidados de arena, arcilla y limo, así como por clastos arredondados a subredondeados del tamaño de grava. Los clastos están compuestos por diferentes litologías, según las rocas aflorantes en las sierras y lomas que circundan a las depresiones o valles que los contienen.

Estos sedimentos tienen por lo general una extensión limitada y su espesor no sobrepasa los 10 m. Por ser los sedimentos más jóvenes de la región, están sobreyaciendo prácticamente a todas las unidades anteriores.

#### **4.2. Geología estructural**

En el área que donde se encuentra el acuífero se pudieron reconocer depósitos evaporíticos del Aptiano, así como caliza de laguna interna, arrecifal, peri-arrecifal, de talud y de cuenca profunda, de edad Albiano-Cenomaniano; los cuales son cubiertos por secuencias mixtas del talud del Cretácico Superior.

Estos depósitos indican que la sedimentación cretácica inicialmente ocurrió dentro de la plataforma, pero al finalizar el Cretácico (Campaniano-Maestrichtiano), la sedimentación ocurrió en el margen y talud de ésta, y estuvo dominada por el aporte de terrígenos.

Este cambio se debió a que a finales del Cretácico, una secuencia de arco volcánico desarrollado durante el Jurásico Superior-Cretácico inferior fue acresionada al occidente de la denominada cuenca Mesozoica del Centro de México, por efecto de las fuerzas compresivas de la orogenia Laramide, esto provocó que se diera un gran aporte de terrígenos y la sedimentación marina, inicialmente carbonácea, se tornara predominantemente terrígena.

El aporte masivo de terrígenos terminó por colmar la cuenca, y los terrígenos transgredieron sobre gran parte de la plataforma Valles-San Luis Potosí. La deformación relacionada a la orogenia Laramide se manifestó progresivamente en el tiempo, primero en la parte oeste (durante el Turoniano), y paulatinamente hacia el este, alcanzando la plataforma a fines del Maestrichtiano o principios del Eoceno, generando pliegues, cabalgaduras y algunas fallas de desgarre.

Las estructuras laramídicas (anticlinales y sinclinales) principales en el área del acuífero son: Sierra de Álvarez; Sierra de Trejo; Anticlinal El Durazno y Anticlinal El Pinto. Sierras de origen volcánico, formadas por fallamiento extensional son: Sierra El Huirico – El Mezquite y Volcán de Atotonilco respectivamente.

La tectónica extensional del paleógeno al Neógeno en la porción central de México, está ligada al desarrollo de la enorme provincia de Cuencas y Sierras, que abarca desde el sur de Canadá hasta la parte central de México y acaso se extiende al sur de la Faja Neovolcánica. Regionalmente los sistemas de fallas generadas en ese tiempo, tienen orientación NW-SE y NE-SW, algunas estructuras representativas de estos sistemas son el graben de Villa de Reyes de orientación NE-SW, los de Bledos y Enramadas con orientación NW-SE, y el sistema de fallas tipo dominó de la sierra de San Miguelito, ligado a la evolución de la provincia de Cuencas y Sierras.

#### **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo a la información conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que conforman el cauce y llanura de inundación de los ríos San Nicolás, Santa Catarina y El Charco Oscuro y otros ríos y arroyos, así como en los conglomerados polimícticos.

Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en rocas volcánicas (brechas volcánicas andesíticas, derrames riolíticos, riolíticos, tobas riolíticas e ignimbritas) y sedimentarias carbonatadas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias al desaparecer su fracturamiento a profundidad y la alteración; así como por las rocas arcillosas. A mayor profundidad las calizas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento debido a que están interestratificadas con lutitas y limolitas. El basamento geohidrológico regional está constituido por una secuencia de anhidritas y yeso con espesor de 3000 m, que se depositó en un ambiente marino de baja energía.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1. Tipo de acuífero**

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, con condiciones locales de **semiconfinamiento** debido a la presencia de sedimentos arcillosos de origen lacustre; heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada y conglomerados, que han sido transportados por los escurrimientos superficiales desde las regiones topográficamente más altas de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. La unidad superior es la que actualmente se explota, presenta predominio de sedimentos finos, que originan bajo rendimiento de los aprovechamientos.

### **5.2. Parámetros hidráulicos**

Como parte del estudio realizado en el 2010, se llevaron a cabo 3 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, de corta duración. De su interpretación por métodos convencionales se determina que los valores de transmisividad varían de  **$1.47 \times 10^{-2}$  a  $2.64 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** ; en tanto que la conductividad hidráulica oscila entre  **$6.5 \times 10^{-4}$  y  $7.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$** .

No se contó con pozo de observación para el cálculo del coeficiente de almacenamiento, pero por correlación con acuíferos vecinos se estimó un valor que varía de **0.032 a 0.047**.

### **5.3. Piezometría**

Únicamente se cuenta con información piezométrica procedente del estudio realizado en 2010.

### **5.4. Comportamiento hidráulico**

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

De acuerdo a la configuración de profundidad al nivel estático para 2010, mostrada en la figura 3, se observa que en toda el área del acuífero las profundidades no sobrepasan los 22 m, aunque hay que considerar que la mayoría de los aprovechamientos son norias.

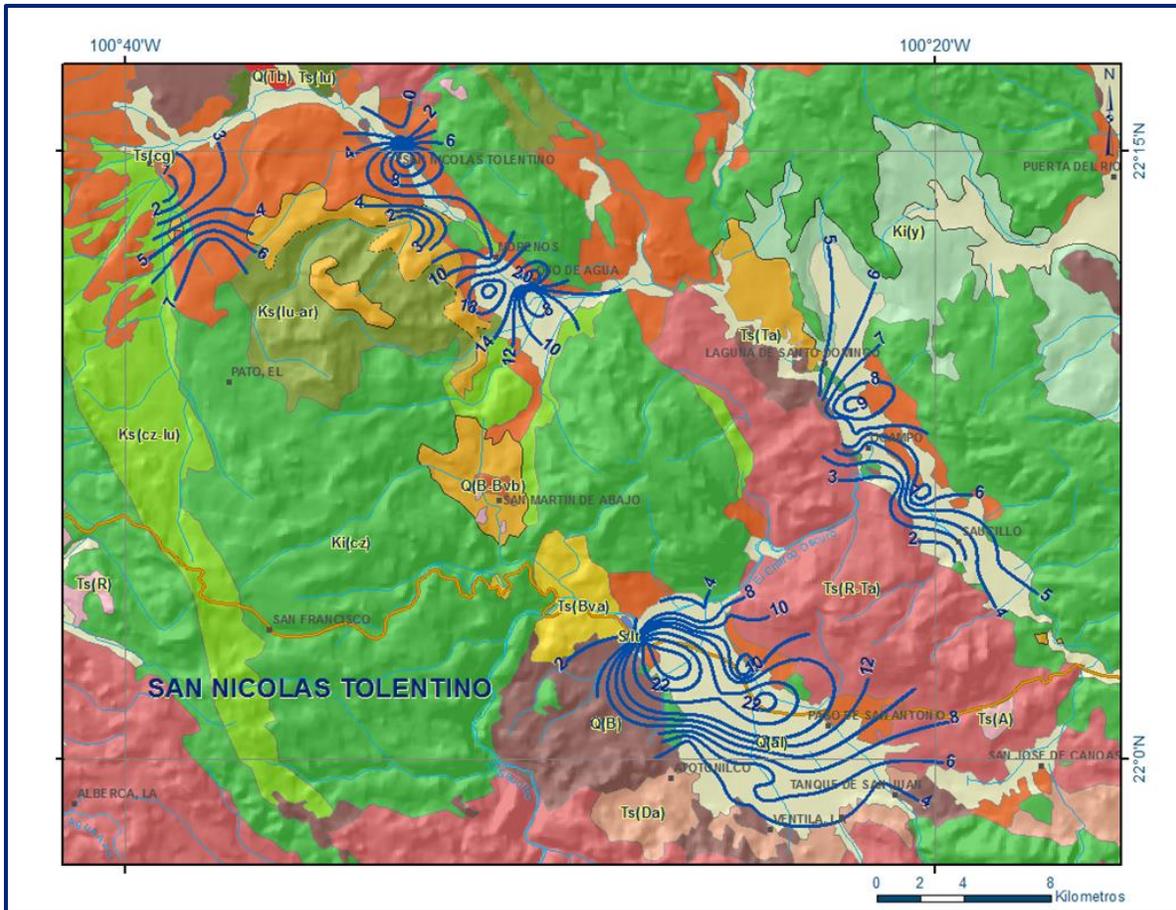


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010).

Debido a que las profundidades son muy someras se presenta el fenómeno de evapotranspiración.

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo a la configuración de elevación del nivel estático para 2010, mostrada en la figura 4, se observan 3 cuencas cuyas planicies están consideradas como valles intermontanos separadas por la sierra de Álvarez al SW, por la sierra de Trejo en la parte central y, delimitando al NE por el Cerro Pinto, Cerro Quemado, El Tablón, Sierra La Noria, teniendo como drenes principales a el Río San Nicolás en la primera y segunda y en la tercera al Río Santa Catarina. Los valores de elevación varían de 1080 a 1780 msnm, presentándose el valor más alto en Laguna de San Isidro con flujo radial hacia Armadillo de los Infante y Villa Hidalgo donde cambia su dirección preferencialmente al noroeste-sureste coincidiendo con la dirección del río San Nicolás, en este lugar las cargas descienden hasta 1490 msnm en Paso del Águila, donde la configuración de las curvas manifiesta una salida continuando el descenso hasta Ojo de Agua con cargas de 1300 msnm.



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

### **5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 26 muestras de agua en distintos aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayores, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Disueltos Totales (SDT) varían de 200 a 1290 ppm, con un promedio de 860 ppm. La temperatura varía de 17 °C a 33.9 °C. De acuerdo con la clasificación de Palmer-Piper, la familia de agua predominante es la Bicarbonatada-Cálcica y en menor proporción la bicarbonatada-mixta y la bicarbonatada-sódica.

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 se clasifican como  $C_2S_1$  (concentración media de sales y bajo contenido de sodio), que es apta para la agricultura, con lavado de suelo y en menor proporción se clasifican como  $C_3S_1$  (alta concentración de sales y bajos contenidos de sodio) que puede ser usada en algunos tipos de suelos con buen drenaje y cultivos tolerantes a las sales.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2010, se registraron un total de 109 aprovechamientos de agua subterránea: 41 pozos, 65 norias y 3 manantiales.

Del total de aprovechamientos, están activos 97 (89%) y los 12 restantes inactivos (11%). El volumen estimado de extracción conjunta asciende **6.0 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 3.14 hm<sup>3</sup> (51.9%) se destinan a las actividades agrícolas, 2.27 hm<sup>3</sup> (37.5%) para abastecimiento de agua potable y los 0.64 hm<sup>3</sup> restantes (10.6%) para satisfacer las necesidades otros usos.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010. 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 de un acuífero:

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

### **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga natural ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, se considerará como recarga inducida solamente al agua destinada al uso agrícola (Rr).

#### **7.1.1. Recarga vertical (Rv)**

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento ( $\Delta V_S$ ) tiende a ser nulo, y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Dónde:

**Eh**= Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh);

**Rv**= Recarga vertical;

**Rr**= Retornos de riego;

**B**= Bombeo;

**Sh**= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

**Dm**= Descarga a través de manantiales;

**ETR**= Evapotranspiración;

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

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

$$Rv = B + Sh + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Rr \quad (2)$$

### 7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área 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 subterráneo horizontal se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

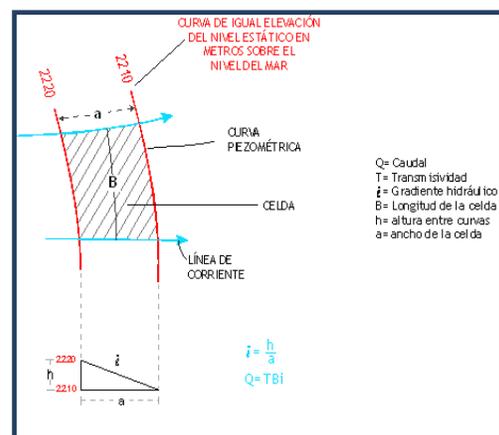
Donde:

**Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

**T** = Transmisividad (m<sup>2</sup>/s)

**B** = Longitud de la celda (m)

**i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona. La recarga total por flujo subterráneo 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.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal.

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradient $e_i$	T ( $m^2/s$ )	CAUDAL Q ( $m^3/s$ )	VOLUMEN ( $hm^3/año$ )
E1	299	1471	10	0.0068	0.0264	0.0537	1.7
E2	258	1990	10	0.0050	0.0264	0.0342	1.1
E3	189	757	10	0.0132	0.0264	0.0659	2.1
E4	195	910	10	0.0110	0.0264	0.0566	1.8
E5	216	3512	10	0.0028	0.0264	0.0162	0.5
E6	970	1754	10	0.0057	0.0211	0.1167	3.7
E7	836	2979	10	0.0034	0.0211	0.0592	1.9
E8	1141	2044	10	0.0049	0.0211	0.1178	3.7
E9	164	1219	10	0.0082	0.0211	0.0284	0.9
E10	673	3996	10	0.0025	0.0147	0.0248	0.8
E11	1140	5848	10	0.0017	0.0147	0.0287	0.9
E12	753	4398	10	0.0023	0.0147	0.0252	0.8
<b>TOTAL</b>							<b>19.9</b>

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **19.9  $hm^3/año$** .

### 7.1.3. Retornos de riego (Rr)

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.

Con base en las condiciones de suelo y tipo de metodología de riego, se definió un coeficiente de infiltración por retorno de riego del 15% sobre un volumen de 3.14  $hm^3/año$  lo que induce una recarga del orden de **0.5  $hm^3/año$** .

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por flujo horizontal subterráneo (Sh), por evapotranspiración (ETR) y por la descarga a través de manantiales (Dm).

### 7.2.1. Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo asciende a **6.0 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

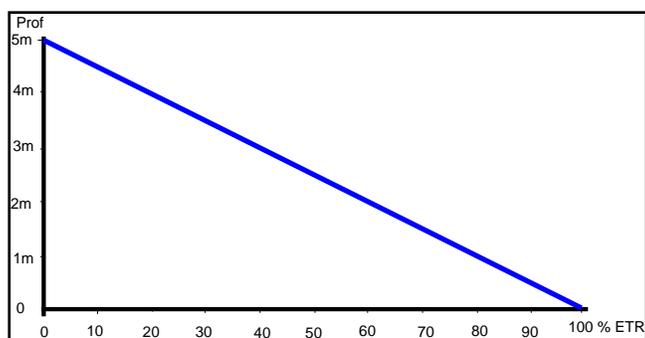
Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	18.5		
P(mm) =	599.3	P <sup>2</sup> =	359160.49
L =	1079.08125	L <sup>2</sup> =	1164416.34
ETR (mm)	545.2		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. De esta manera, tomando en cuenta una superficie de 6.4 km<sup>2</sup>, en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 4 m, en la que existe cobertura vegetal y con una lámina de evapotranspiración de 545.2 mm (obtenida con valores de 599.3 mm anuales para la precipitación y 18.5 °C de temperatura), de acuerdo con la gráfica:  $ETR = 6.2 \text{ km}^2 (0.5452 \text{ m}) (0.2) = 0.7$ .

Por lo tanto, la **ETR = 0.7 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

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

Los cálculos se pueden observar en la tabla 3. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja de las áreas de explotación.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2010)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradient e i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN N (hm <sup>3</sup> /año)
S1	2707	1175	10	0.0085	0.0211	0.4861	15.3
S2	1029	1849	10	0.0054	0.0211	0.1174	3.7
S3	449	7118	10	0.0014	0.0147	0.0093	0.3
S4	773	3666	10	0.0027	0.0147	0.0310	1.0
S5	230	2615	10	0.0038	0.0264	0.0232	0.7
S6	758	2443	10	0.0041	0.0264	0.0819	2.6
S7	320	1558	10	0.0064	0.0264	0.0542	1.7
<b>TOTAL</b>							<b>25.3</b>

El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **25.3 hm<sup>3</sup>/año**.

#### 7.2.4. Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la existencia de 17 manantiales, que en conjunto descargan un caudal de 28.54 lps, que representan un volumen de **0.9 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica confiable para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

#### Solución a 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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR + Dm \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \\ R_v &= 6.0 + 25.3 + 0.7 + 0.9 + 0.0 - 19.9 - 0.5 \\ R_v &= 12.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + Eh + Ri \\ R &= 12.5 + 19.9 + 0.5 \\ R &= 32.9 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

## 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:

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

Donde:

**DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **32.9 hm<sup>3</sup>/año**.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **DNC = 18.6 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 **8,457,242 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 32.9 - 18.6 - 8.457242 \\ \text{DMA} &= 5.842758 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **5,842,758 m<sup>3</sup> anuales**.