



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL
DE AGUA EN EL ACUÍFERO NOCHISTLÁN (3208), ESTADO
DE ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1 Localización del acuífero.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima	7
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología	8
4. GEOLOGÍA	9
4.1 Estratigrafía.....	12
4.2 Geología estructural.....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1 Tipo de acuífero.....	17
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
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.....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2 Salidas.....	26
7.2.1 Bombeo (B).....	26
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	26
7.2.4 Descarga de manantiales (Dm)	28
7.2.5 Descarga por flujo base de ríos (Dfb).....	28
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	28
8. DISPONIBILIDAD.....	29
8.1 Recarga total media anual (R)	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA.....	32

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 del acuífero

El acuífero Nochistlán, definido con la clave 3208 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sur del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Jalisco, entre los paralelos 21°12'17" y 21°38'53" de latitud norte y entre los meridianos 102°37'33" y 103°03'00" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 834 km².

Limita al norte y oeste con el acuífero Jalpa-Juchipila, del estado de Zacatecas; al noreste y este con Encarnación; al sur y sureste con Yahualica; y al suroeste con Los Puentes, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco (figura 1).

Geopolíticamente, el territorio que cubre el acuífero comprende totalmente el municipio Apulco, la mayor parte de Nochistlán de Mejía y porciones muy pequeñas de los municipios Moyahua de Estrada, Juchipila y Apozol.

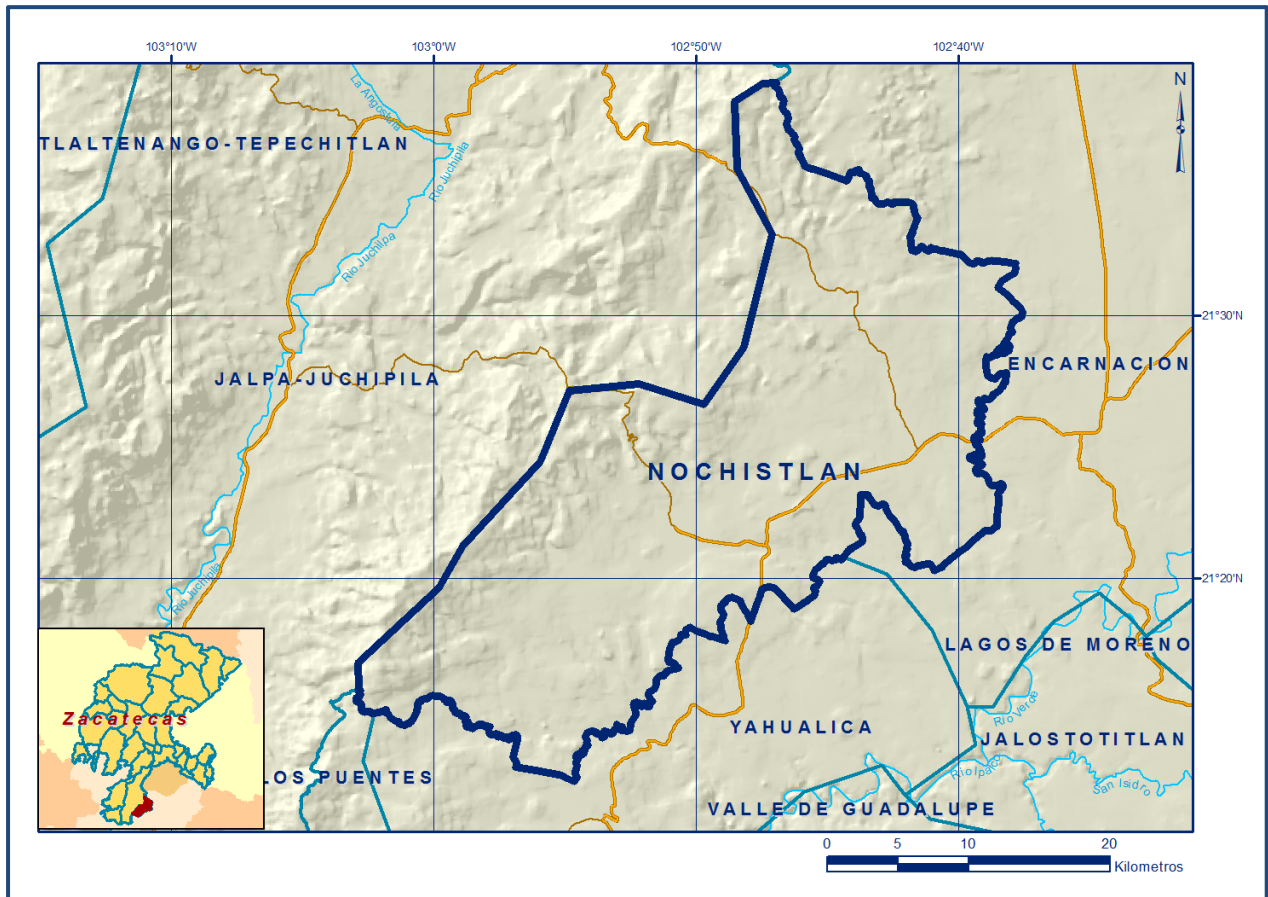


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUIFERO 3208 NOCHISTLAN

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	2	52.5	21	16	47.8	
2	102	59	48.0	21	19	40.1	
3	102	58	53.6	21	21	13.8	
4	102	55	56.7	21	24	27.4	
5	102	54	50.2	21	27	9.2	
6	102	52	9.9	21	27	25.8	
7	102	49	41.8	21	26	37.4	
8	102	48	11.0	21	28	48.9	
9	102	47	5.5	21	33	8.4	
10	102	48	26.4	21	35	36.0	
11	102	48	31.1	21	38	9.4	
12	102	47	27.6	21	38	51.8	
13	102	46	55.5	21	38	52.3	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	102	44	22.2	21	20	48.6	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	103	2	16.5	21	14	52.6	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	103	2	51.2	21	15	50.5	
1	103	2	52.5	21	16	47.8	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Nochistlán pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico, al Consejo de Cuenca Río Santiago, instalado el 14 de julio de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios señalados”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de agosto de 1988. Este decreto es de tipo III, en el que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de exploración y evaluación; a continuación, se citan los más importantes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LAS ZONAS DE TLALTENANGO–JUCHIPILA ESTADO DE ZACATECAS. Realizado

por Técnicos Asesores y Constructores, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1980. El objetivo del estudio fue conocer el marco geológico, definir la calidad y distribución del agua subterránea y definir la condición geohidrológica del acuífero. Consistió en un reconocimiento de la zona, un inventario de aprovechamientos de agua subterránea, así como verificaciones geológicas e hidrológicas y recolección de muestras de agua para su análisis químico.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO JALPA-JUCHIPILA EN ZACATECAS. Realizado por Consultoría BETSCO S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2005. El objetivo general del estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Consistió en actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas, llevar a cabo el censo de captaciones de agua subterránea, obtener los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, actualizar el modelo hidrogeológico y la caracterización hidrogeoquímica, determinar el volumen de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, así como cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga natural, inducida y artificial, así como elaborar el balance hidrometeorológico de la subcuenca y de aguas subterráneas del acuífero. El estudio concluye que el acuífero no presentaba una condición de sobreexplotación.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS DE: NOCHISTLÁN Y TLALTENANGO-TEPECHITLÁN, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua, en 2008. El objetivo general del estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Entre sus actividades de campo más relevantes destacan el censo e hidrometría, nivelación de brocales y ejecución de pruebas de bombeo. Establece también una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información piezométrica, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, que permiten conocer la condición actual y la evolución en el tiempo de los niveles del agua subterránea. El estudio concluye que el acuífero se encuentra en condición de subexplotación.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO NOCHISTLÁN, ZACATECAS.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El estudio realizado en 2008 y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son 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

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la zona de transición de las provincias fisiográficas Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica entre la provincia Sierra Madre Occidental, subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos, y el Eje Neovolcánico, subprovincia Altos de Jalisco.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias. La subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2,300 a 2,700 msnm, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son de pendientes suaves, con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago.

Eje Neovolcánico se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Cenozoico. Está integrada por grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico", integrado por los volcanes de Colima, Tancítaro, Nevado de Toluca, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, La Malinche y Pico de Orizaba, que casi

en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19°. La subprovincia Altos de Jalisco se ubica en su mayor parte en el estado de Jalisco, se caracteriza por amplias mesetas de origen volcánico y presenta la mayor densidad de topoformas degradativas, generadas por disección hídrica y abundancia de valles profundos de laderas escarpadas a fines de los caños de la Sierra Madre Occidental.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero domina el clima semiseco (A)C(wo)semicálido subhúmedo del grupo C, 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. Hacia el extremo montañoso norte y occidental, el clima es templado subhúmedo en su variante C(w1), que presentan temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. En la porción nororiental se registra clima BShw semiárido, semicálido, 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. En todos los casos la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; régimen de lluvias en verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 8 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Tlachichila, Tenayuca, Nochistlán, Palma Cuata, Paso del Sabino, Ahuetita, Calera y Michoacanejo. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1951-2010 y el más corto 2000-2017, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de **648.9 mm, 17.6 °C y 1,910.0 mm**, respectivamente.

La precipitación media anual varía de 600 a 700 mm; la temporada de lluvias se presenta de junio a octubre. Las menores precipitaciones ocurren durante los meses de febrero, marzo y abril. El mes más caluroso es mayo con un promedio de 21 °C y el más frío es enero con un promedio de 10 °C. La región presenta heladas en un rango de 20 a 40 días por año.

3.3 Hidrografía

La zona en la que se ubica el acuífero se localiza en la porción norte de la Región Hidrológica (RH) No. 12 "Lerma-Santiago", Subregión Hidrológica Alto Santiago, cuenca y subcuenca del Río Verde-Grande. La RH 12 comprende el 40% del estado de

Zacatecas y su importancia radica en que en ella se ubican la mayor parte de los aprovechamientos, tanto de obras de infraestructura hidráulica como de escurrimientos y sus corrientes son afluentes del río Grande Santiago, en el cual desembocan los ríos del sureste de Zacatecas. Los principales ríos que desembocan en el Pacífico a través de otros estados y que pertenecen a este sistema son: San Pedro, Juchipila, Jerez, Tlaltenango, San Andrés, Atengo y Valparaíso.

La cuenca del Río Verde-Grande tiene una superficie de 3,123.4 km², su corriente principal es la primera de verdadera importancia de los afluentes derechos del Río Santiago. Se origina a 20 km al sur de Zacatecas, donde se encuentra la parte más elevada de su cuenca; su desembocadura en el Río Santiago ocurre cerca de la ciudad de Guadalajara, 10 km al noreste del centro de esta ciudad. Su longitud, desde su inicio hasta su confluencia es de 350 km con dirección hacia el suroeste.

La corriente principal del acuífero es el Río Nochistlán, el cual nace en la comunidad La Cieneguita y escurre en dirección noreste a sureste desembocando en el Río Verde. Cuenta con los siguientes afluentes: Arroyo de los Sandoval, Los Arcos, Río de Huisquilco, Río de Santiago y Arroyo del Acualaque. La infraestructura hidráulica está representada por varios bordos y represas que son utilizados para almacenar agua para abrevadero.

3.4 Geomorfología

La región que forma parte del sistema volcánico de la Sierra Madre Occidental se caracteriza por ser una región montañosa, que presenta una morfología de sierras con cimas aplanadas y barrancas y cañones profundos, que en conjunto presentan una orientación NE-SW. El relieve está representado por mesetas volcánicas de piroclastos, intensamente disectadas y drenadas por corrientes dispuestas en patrones de drenaje sub-paralelos, originados por el control estructural que ejercen las fallas y fracturas plio-cuaternarias.

Las geoformas son el producto de la composición litológica de las rocas y de los procesos endógenos y exógenos que han ocurrido en la región a través del tiempo geológico. Se distinguen las siguientes geoformas: Sierras, Valles y Mesetas.

Las sierras están formadas por rocas sedimentarias, principalmente lutitas, areniscas y calizas de edad cretácica. Presentan formas alargadas y plegadas con dirección NE-SW, cuyo levantamiento se originó por el empuje de intrusivos graníticos; alcanzando una máxima elevación de 3,100 msnm en la zona. Las mesetas están conformadas por

rocas ígneas de tipo tobáceo y riolítico que fueron emitidas por erupciones volcánicas explosivas y derrames lávicos de tipo ácido. Presentan un basculamiento hacia el suroeste y son disectadas por la acción erosiva de los ríos y arroyos. Los esfuerzos distensivos en el área provocaron cuencas tectónicas, las cuales han sido rellenadas con depósitos de sedimentos clásticos. Los valles se alojan en las regiones topográficamente más bajas, que han sido rellenadas con depósitos de sedimentos clásticos. Están flanqueados por lomeríos bajos de conglomerados del Paleógeno-Neógeno y por rocas volcánicas. Son angostos y alargados, orientados en dirección NE-SW.

La zona desarrolla un drenaje de tipo dendrítico con enrejado denso, controlado por la disposición que guardan los estratos y las fracturas. Se encuentra en una etapa geomorfológica de rejuvenecimiento, si se considera que las grandes efusiones piroclásticas dieron lugar a mesetas semejantes a inmensos valles construccionales, que actualmente están siendo disectados, definiendo barrancas y depresiones.

4. GEOLOGÍA

El área se ubica en la porción centro-sur de la Provincia Geológica Faja Ignimbrítica Mexicana que se originó por el vulcanismo propiciado por la Subducción de la Placa Farallón debajo de la corteza Laurentiana; de allí la orientación adoptada similar a la traza de la subducción. Durante el Cenozoico el Occidente de México estuvo sujeto a la influencia de un arco magmático generado por la tectónica convergente que afectó la región (Mc Dowell y Clabaugh, 1979), dando lugar al paquete volcánico que conforma la Sierra Madre Occidental (SMO), que inició durante el Eoceno Medio con derrames riolíticos y eventos ignimbríticos. El Oligoceno-Mioceno de la SMO según Damon et al., 1981, se generó en dos eventos; al principio del Oligoceno (Mc Dowell y Keizer, 1977) se depositaron rocas de composición intermedia constituidas por andesitas y andesitas basálticas, que conforman la secuencia andesítica inferior. El segundo evento aportó las rocas de mayor distribución, con espesores mayores a 800 m, de una secuencia continua en la que predominan las tobas riolíticas, riolitas-ignimbritas y dacitas, con edades del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (Mc Dowell y Keizer, 1977; Roesler et al., 1994); dentro de este paquete se presentan de manera local brechas riolíticas y basálticas.

A partir del Mioceno Medio se llevó a cabo un nuevo evento volcánico bimodal que corresponde a la manifestación del Eje Neovolcánico, las rocas más antiguas de este evento están representadas por una roca de composición andesítica. El Mioceno Superior se manifiesta por la presencia de tobas riolíticas y basaltos que están

representados por una serie de coladas. Durante el Neógeno se depositaron una serie de areniscas arcillosas, capas conglomeráticas y tobas líticas que rellenaron las fosas tectónicas de Aguascalientes y Tlaltenango. Los horizontes de gravas están empacados por arenas gruesas y medianas que presentan materiales disgregados y transportados, así como cenizas, cuyo espesor se estima superior a 200 m. Entre Moyahua de Estrada y Tabasco, Zac., existe un paquete sedimentario continental depositado como rellenos de fosa de edad Plioceno que consta de calizas, lutitas, areniscas y lentes de conglomerados de hasta 200 m de espesor; las calizas que afloran en el camino Palmarejo-Atecajete, al sur de Moyahua y en el arroyo del Laurel, antes de desembocar al río Juchipila, contienen gasterópodos. Al suroeste de Huanusco, en las cercanías del poblado Guatemala, se encontró fauna en las areniscas de esta unidad. Posteriormente a esta secuencia se tiene una unidad de conglomerados oligomícticos y polimícticos del Plioceno Medio, sobre los que descansan derrames basálticos del Plioceno, que a su vez son cubiertos por tobas basálticas. Los eventos volcánicos se manifestaron hasta el Plio-Cuaternario, definidos por medio de dataciones radiométricas realizadas por Nieto et al., 1985 y Moore et al., 1994, que reportan edades entre 3.19 a 3.77 Ma.

Durante el Pleistoceno-Holoceno se depositaron cenizas riolíticas y lapilli, de estratificación masiva, y arena fina con estratificación cruzada, que presentan restos de vertebrados datados con paleontología por D.H. Láscars (1979), quien las denomina Toba Aguascalientes. Rellenando las depresiones topográficas se encuentra material de aluvión que fue transportado por los ríos y arroyos, constituido principalmente por gravas, arenas y limos. Por último, las rocas ígneas intrusivas que cortan la secuencia volcánica cenozoica afloran en localidades restringidas en forma de granitos, granodioritas y dioritas. En algunos lugares se observa la presencia de cuerpos intrusivos de tipo pórfido andesítico y pórfido dacítico, a los que se le atribuye la mineralización en Mezquital del Oro, Las Caballerías, al sureste de Jalpa, y Aréchiga (Carta Geológico-Minera Aguascalientes F13.9. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

Las rocas ígneas son de composición ácida, intermedia y básica. Las ácidas son de tipo explosivo, emitidas principalmente a través de aparatos volcánicos tipo caldera que corresponden principalmente a flujos de ignimbritas. Las de composición intermedia están representadas por andesitas, extravasadas como derrames a través de aparatos volcánicos ya erosionados y en algunos casos asociadas a calderas. Las rocas de composición basáltica se presentan en forma de derrames que fueron emitidos a través de fracturas. Los afloramientos más extensos son los de las ignimbritas y en algunas áreas están profundamente erosionadas, formando grandes depresiones que

originaron lagos, donde se depositaron calizas y lutitas; además de arcillas, areniscas y conglomerados, éstas dos últimas con alto contenido de sedimentos finos (figura 2).

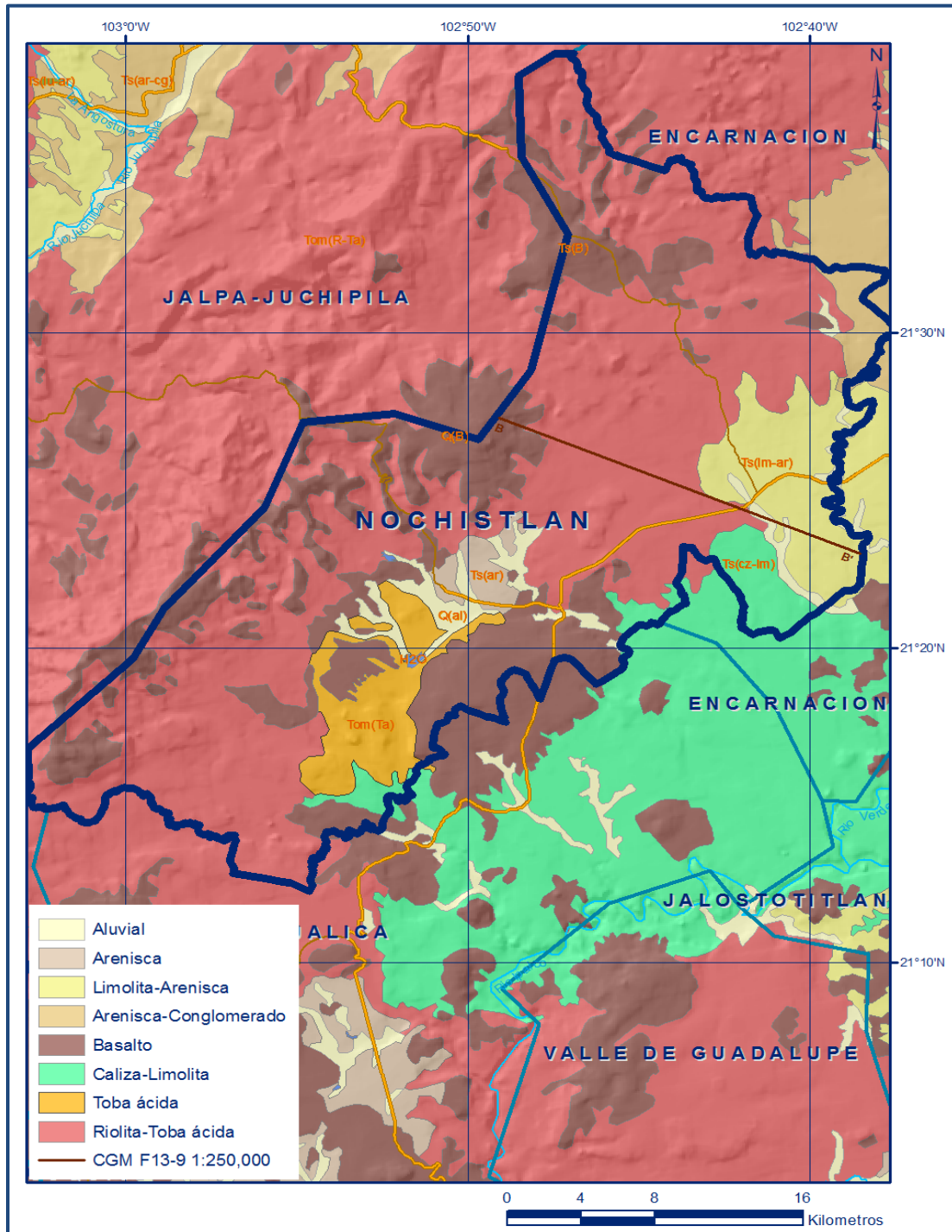


Figura 1. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica comprende rocas ígneas extrusivas e intrusivas, así como sedimentarias continentales y lacustres cuyo registro varía del Cenozoico al Cuaternario.

CENOZOICO

Andesitas

Son derrames de andesitas de color gris a gris oscuro, con algunas intercalaciones de brechas y aglomerados, que presentan textura tanto porfídica como afanítica y estructura compacta, con escasos sistemas de fracturas. La datación radiométrica practicada en una muestra obtenida en la Sierra Morones, cerca del Rancho Aréchiga, ubicado a unos 10 km al poniente del poblado de Jalpa, le asignan una edad Eoceno-Oligoceno (48.1 ± 2.6 Ma). Sus mayores afloramientos se ubican principalmente en la base de los altos de falla o pilares tectónicos. En algunas localidades los afloramientos de estas rocas están asociados volcanes y calderas. Estas rocas constituyen el basamento geohidrológico de los acuíferos alojados en las ignimbritas.

Riolitas e ignimbritas

Son depósitos derivados de flujos piroclásticos del tipo de nubes ardientes, presentan diferentes estructuras, texturas y composición, que permiten ser diferenciadas en las 3 unidades en que se agruparon. La unidad de tobas riolíticas que conforma la base de la secuencia, la unidad de ignimbritas y riolitas que presentan estructura compacta por solidificación de las partículas de lava que arrastró la explosión y se soldaron con los demás elementos; tienen composición principalmente dacítica, con algunos derrames de composición riolítica. Por último, la unidad de derrames riolíticos e ignimbritas compactas, entre cuyos pseudoestratos se encuentran esporádicos derrames de basaltos.

Las rocas muestran en conjunto una coloración rojiza, con tonos amarillentos y presentan un aspecto fisiográfico en forma de extensas mesas profundamente disectadas y afectadas por diversos sistemas de fracturas y fallas. La edad que se les ha asignado varía del Oligoceno Superior al Mioceno, de acuerdo a las determinaciones radiométricas realizadas que arrojaron edades absolutas de 25.2 ± 2.2 Ma., 24.9 ± 2.7 Ma., y 23.7 ± 1.4 Ma. Las muestras fueron tomadas en el extremo sur de la Sierra Fría, unos 5 km al noreste de Juchipila. Los principales afloramientos constituyen las sierras Morones al oeste y, Fría y Nochistlán al este. En conjunto estas rocas presentan un aspecto fisiográfico en forma de extensas mesas profundamente disectadas, afectadas por diversos sistemas de fracturas y fallas. En la sierra de

Nochistlán, aflora principalmente la unidad de riolitas-ignimbritas, cubiertas por los derrames de basaltos del Mioceno, principalmente al sur de la sierra.

Derrames de basaltos

Son derrames emitidos durante el Mioceno Superior y corresponden a las primeras manifestaciones de la provincia geológica Eje Neovolcánico, cuyo borde nor-central representa el acuífero. En esta zona el vulcanismo se manifestó tanto a través de aparatos volcánicos como por fracturas. Sus afloramientos constituyen una secuencia de brechas color gris oscuro y rojizo, de estructura compacta y fracturada; ocurren principalmente al sur y centro del área en su colindancia con la provincia geológica mencionada, donde se encuentran varios aparatos volcánicos que derramaron grandes cantidades de lava que rellenaron depresiones, dando lugar a extensas mesetas y estrechos cañones. A medida que se adentra en el área que cubre el acuífero sus afloramientos se hacen menos frecuentes y de menor superficie. Esta unidad basáltica es de origen fisural, emplazándose en las zonas de debilidad, controlada estructuralmente por las fallas profundas. Por su posición estratigráfica con las demás unidades expuestas, se le asignó una edad tentativa del Mioceno, correlacionable con la Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental.

Calizas y lutitas lacustres

Las rocas lacustres están constituidas por calizas de color de grano muy fino (mudstone) que presentan color gris claro a medio, dispuestas en estratos delgados, con intercalaciones esporádicas de lutitas de color gris verdoso y amarillento. Están afectadas por algunos sistemas de fracturas y un echado persistente al noroeste. Son cubiertas parcialmente por areniscas y un conglomerado arcilloso oligomíctico, de tonalidades rojizas y medianamente consolidado. Sus afloramientos se observan en toda la porción suroriental, mostrando espesores máximos de 200 m y dando lugar a lomeríos de cimas aplanadas y pendientes menores de 2%. La acumulación de los sedimentos que conforman estas rocas ocurrió cuando la emisión de basaltos cerró los valles tectónicos.

Conglomerado oligomíctico

Roca sedimentaria clástica continental, conformada por conglomerados con clastos de calizas, basaltos, riolitas, tobas riolíticas, Ignimbritas, vidrio y areniscas, que varían en tamaño desde arenas hasta gravas, embebidos en una matriz limo-arcillosa. Los clastos son depositados en forma de abanicos aluviales, de composición y espesor variables. Estratigráficamente se encuentra en discordancia con las rocas sedimentarias cretácicas y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno; su grado de

compactación varía de semicompacto a semisuelto y presenta condiciones geohidrológicas favorables para constituir acuíferos de potencial moderado.

El conglomerado cubre en discordancia a las calizas-lutitas del Cretácico Inferior y a las rocas ígneas extrusivas e intrusivas en la localidad Ojo de Agua, subyacen a los aluviones del Holoceno que se encuentran sólo en los cauces de los arroyos. Por su posición se consideran de edad Mioceno. Los conglomerados afloran entre las poblaciones de Tabasco y Jalpa, constituyendo pequeñas lomas de cimas aplanadas.

Conglomerado polimíctico

Roca sedimentaria clástica continental, depositada en forma de abanicos aluviales, de composición y espesor variables. Estratigráficamente, se encuentra en discordancia con las rocas sedimentarias cretácicas y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno. Sus clastos muestran disposición caótica, subangulosos a subredondeados y representan fragmentos de calizas, basaltos, riolitas, tobas riolíticas, ignimbritas, vidrio y areniscas, que varían desde arenas hasta gravas, con diámetros que varían de 3 a 70 cm, embebidos en una matriz compuesta de limos, arcillas y en menor proporción arenas, mal consolidadas y clasificadas.

Tienen una orientación controlada por los esfuerzos tensionales que provocaron fallas normales y dieron origen a la formación de cuencas. El espesor en el poblado de San José de Félix es de 200 m, superficialmente presenta una costra de tipo calichosa. Esta unidad presenta una coloración que varía de gris a café amarillento, de estructura masiva; su grado de compactación varía de semicompacto a semisuelto, condiciones que le confieren buenas propiedades geohidrológicas para constituir acuíferos.

Afloran cubriendo en discordancia a las calizas-lutitas del Cretácico Inferior y las rocas ígneas extrusivas e intrusivas en la localidad Ojo de Agua, y subyacen a los aluviones del Holoceno, que se localizan solo en los cauces de los arroyos. De acuerdo a su posición estratigráfica se consideran del Mioceno. Estos conglomerados se pueden correlacionar las rocas de este tipo que afloran ampliamente en el sur del estado de Zacatecas.

CUATERNARIO

Depósitos de Aluvión

Unidad detrítica no consolidada de origen aluvial y fluvial, constituida por depósitos recientes formados por sedimentos de formas subredondeadas a redondeadas que son producto de erosión de las rocas existentes y que rellenan los valles y márgenes de ríos y arroyos; así como como por los depósitos residuales y de piedemonte. Está

representada por depósitos de gravas, arenas y limos mezclados en todas proporciones; que se acumularon en las regiones topográficamente más bajas, principalmente en las márgenes y lechos de ríos y arroyos. Su espesor máximo es de 10 m. Entre sus componentes destacan los líticos de calizas, conglomerados, areniscas y rocas volcánicas. Los fragmentos o clastos gruesos se localizan en las cercanías de las sierras mientras que los finos en el centro de los valles, en donde localmente desarrollan suelos arcillosos.

4.2 Geología estructural

Los principales lineamientos estructurales de primer orden representan un fallamiento normal en forma escalonada, produciendo así el modelo de fosas y pilares que caracteriza la región. Las fosas presentan un rumbo general NE-SW, con un ancho promedio de 12 km, como son las fosas Bolaños, Tlaltenango, Jalpa y Juchipila. Los lineamientos de segundo orden corresponden a un fallamiento de rumbo N-S, y los de tercer orden presentan un rumbo NW-SE. En el pilar tectónico de Sierra de Morones existen conos volcánicos que originaron curvilineamientos de entre 15 a 20 km de diámetro; existen además otros curvilineamientos paralelos que pueden deberse a calderas sepultadas, que muestran un fallamiento radial de rumbo NE. Las fases de deformación de la región se relacionan con eventos compresivos ocurridos durante el Mesozoico y Cenozoico, y fases distensivas evidenciadas por el fallamiento normal y el emplazamiento plutónico Cretácico-Cenozoico, así como el vulcanismo Cenozoico (Carta Geológico-Minera Aguascalientes F13-9. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

Estructuralmente se han reconocido fallas normales y fracturas, así como aparatos volcánicos con derrames asociados y extensas mesetas piroclásticas. Las fallas normales se presentan con una orientación norte-sur y conforman fosas tectónicas y escalonamientos estructurales. Las fracturas están dispuestas en dos orientaciones preferenciales de NW-SE y NE-SW, originadas por eventos distensivos comunes a toda la región, debido a los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide. Están representados varios eventos distensivos que se manifestaron en el Cenozoico, como consecuencia del movimiento tectónico que afectó a las rocas mesozoicas y cenozoicas, produciendo anticlinales y, sinclinales, orientados al NW-SE y N-S, afectados por fallas laterales y normales, fracturas y cabalgaduras con dirección al noreste, en las que varias fases de intrusión fueron controladas al N y S por dos zonas de fallas W-NW, que se superponen y que representan las fallas del basamento anterior a la Orogenia Laramide, reactivadas a partir del Eoceno. Los eventos geológicos más importantes en la región, presentes en la Sierra Madre Occidental, son vulcanismo y fallamiento.

Regionalmente, las estructuras más antiguas están conformadas por la secuencia de rocas sedimentarias de calizas-lutitas, que muestran un sistema de pliegues de anticlinales y sinclinales, con rumbo general noroeste, recostados al noreste, asociados a fallas de tipo normal con dirección W-NW. Estas estructuras afloran en el acuífero vecino Jalpa-Juchipila. La zona se caracteriza por presentar mesetas y valles; las mesetas son de origen volcánico intensamente disectadas y drenadas por corrientes dispuestas en patrones subparalelos originados por el control estructural que ejercen las fallas y fracturas plio-cuaternarias. Los valles son fosas tectónicas limitadas por fallas normales (grabens), rellenas parcialmente por materiales continentales clásticos, vulcanoclásticos y lacustres.

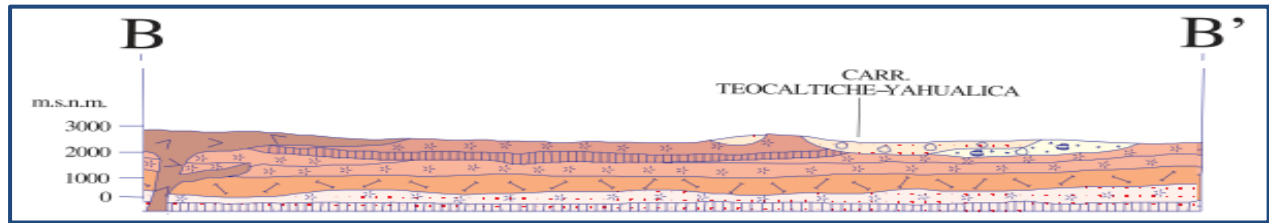
En las rocas volcánicas de la Serie Inferior del Paleógeno, que forman la Sierra Madre Occidental, constituida por andesitas, tobas riolíticas-flujos piroclásticos, ignimbritas, riolitas y basaltos, se presentan flujos y pseudo estratificaciones, con inclinaciones al noroeste. En algunas localidades se invierte este sistema por efecto de fallamiento normal y de fallas de movimiento lateral. El rumbo en estas unidades volcánicas presenta una orientación de NW-SE y NE-SW, con echados casi verticales, asociadas en su mayoría a fallas de tipo normal que tienen esa misma orientación.

4.3 Geología del subsuelo

Con base en los resultados de la geología del subsuelo: sondeos geofísicos realizados en estudios previos, descripción de cortes litológicos y la interpretación de la información hidrogeológica, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento; conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente. El medio granular está constituido por materiales aluviales de granulometría variada y los conglomerados que constituyen los depósitos de talud. El medio fracturado está conformado por rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno (riolitas e ignimbritas), y a mayor profundidad por la secuencia de calizas y lutitas del Cretácico.

Existe interconexión hidráulica entre ambos medios, de tal manera que el espesor del acuífero puede alcanzar varias decenas de metros en el centro de los valles, dependiendo de la profundidad del fracturamiento, y disminuir gradualmente hacia los flancos de las sierras que los rodean. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al

desaparecer el fracturamiento a profundidad, y localmente por rocas intrusivas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera "Aguascalientes" F13-9 Esc. 1:250,000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado. La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría que varía de gravas a arcillas y conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar hasta 200 m en el centro del valle, que fueron depositados en fosas de origen tectónico, ocasionadas posiblemente por el fallamiento escalonado en forma de horts y grabens, provocado por la tectónica distensiva desarrollada durante el Oligoceno. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica y en menor proporción basáltica, así como lutitas y calizas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Localmente, la presencia de calizas lacustres y horizontes arcillosos, le confieren al acuífero condiciones de **semiconfinamiento**.

El espesor conjunto de las rocas volcánicas es superior a 400 m, ya que los pozos perforados en ellas a dicha profundidad no han atravesado toda la unidad. De acuerdo con la información geofísica, la última capa detectada está formada por material arcillo-arenoso de baja resistividad sin interés geohidrológico, por lo que es posible que esta unidad constituya el basamento del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2008, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo. Adicionalmente, en el año 2005 se ejecutaron 6 pruebas más en el acuífero vecino Jalpa-Juchipila que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica; todas las pruebas fueron de corta duración, en etapas de abatimiento y recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos

convencionales se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre **0.08** y **2.7 x 10⁻³ m²/s (6.9 a 233.3 m²/d)**. Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 200 m, los valores de conductividad hidráulica varían entre **4.0 x 10⁻⁷** y **1.4 x 10⁻⁴ m/s (0.035 a 1.2 m/d)**. Los valores de transmisividad y conductividad hidráulica son en general bajos, debido a la compactación y granulometría fina de las rocas que conforman el acuífero, como lo confirman los caudales bajos específicos de algunos pozos.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, para fines del balance de aguas subterráneas, considerando el tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.02**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información obtenida como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2008 así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2008-2018, que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2018 muestra que los valores variaron, de manera general, de 3 a 100 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle del río Nochistlán y arroyos hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan y hacia el norte. Los niveles estáticos someros, de 3 a 20 m, se presentan a lo largo del cauce del río Nochistlán y en la porción suroccidental, entre las localidades El Molino y Las Huertas; en tanto que los más profundos, de 90 a 100 m, se registraron hacia las zonas topográficamente más altas que rodean el valle de Nochistlán y en la porción oriental que limita con el acuífero Encarnación del estado de Jalisco, entre los poblados Apulco y La Estancia (figura 4).

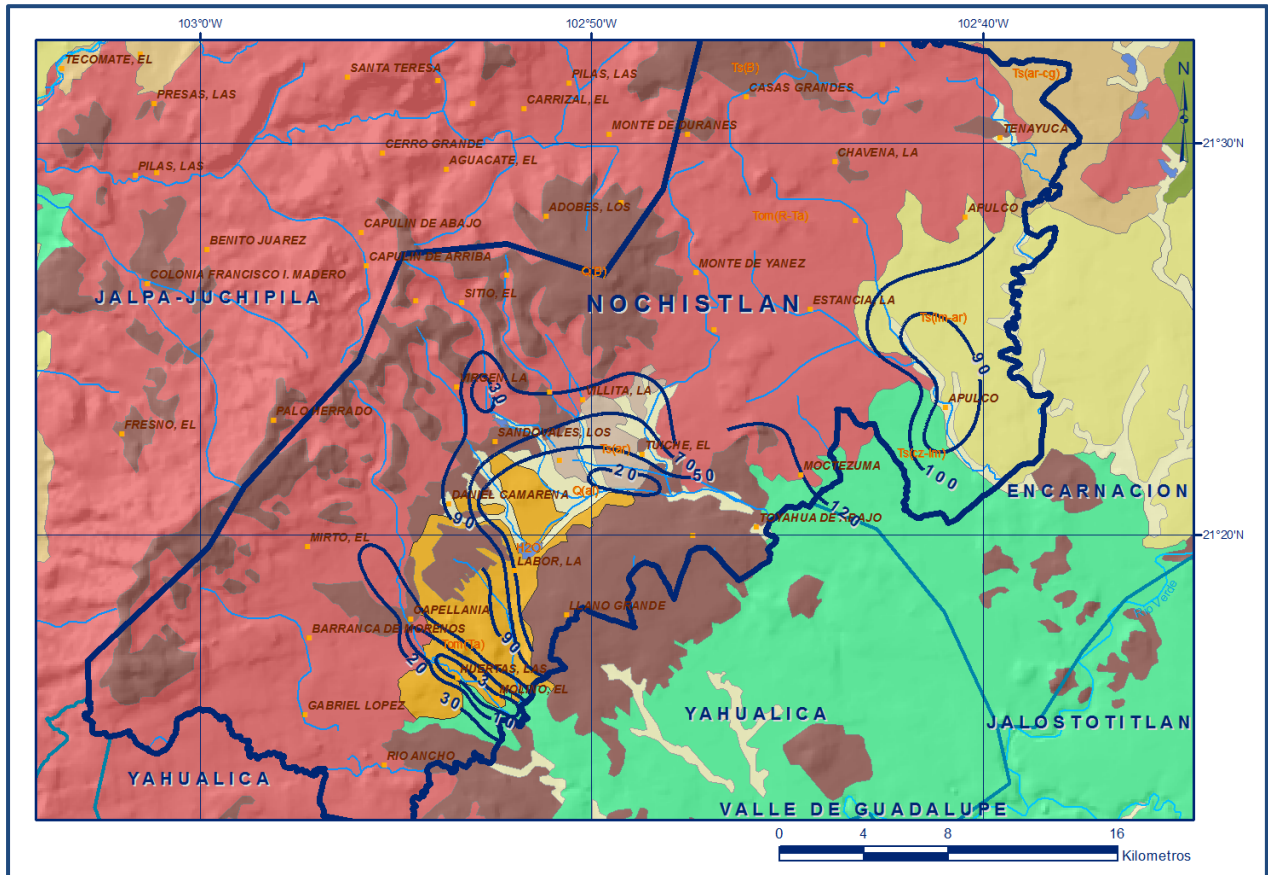


Figura 4. Profundidad del nivel estático en m (2018)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2018 registró valores que variaron de 1,710 a 1,960 msnm. Las menores elevaciones de 1,710 a 1,735 msnm se registran en los extremos suroccidental y oriental del acuífero, entre los poblados El Molino y Las Huertas y entre Apulco y La Estancia, respectivamente, en el límite con el estado de Jalisco. Las mayores elevaciones de 1,850 a 1,960 msnm se registran en la porción occidental, hacia las estribaciones de la sierra de Nochistlán, desde donde descienden gradualmente por efecto topográfico, al igual que lo valores de profundidad, hacia el suroeste del acuífero, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo NE-SW, paralela a la dirección de escurrimiento del río Nochistlán y de la red de drenaje superficial (figura 5).

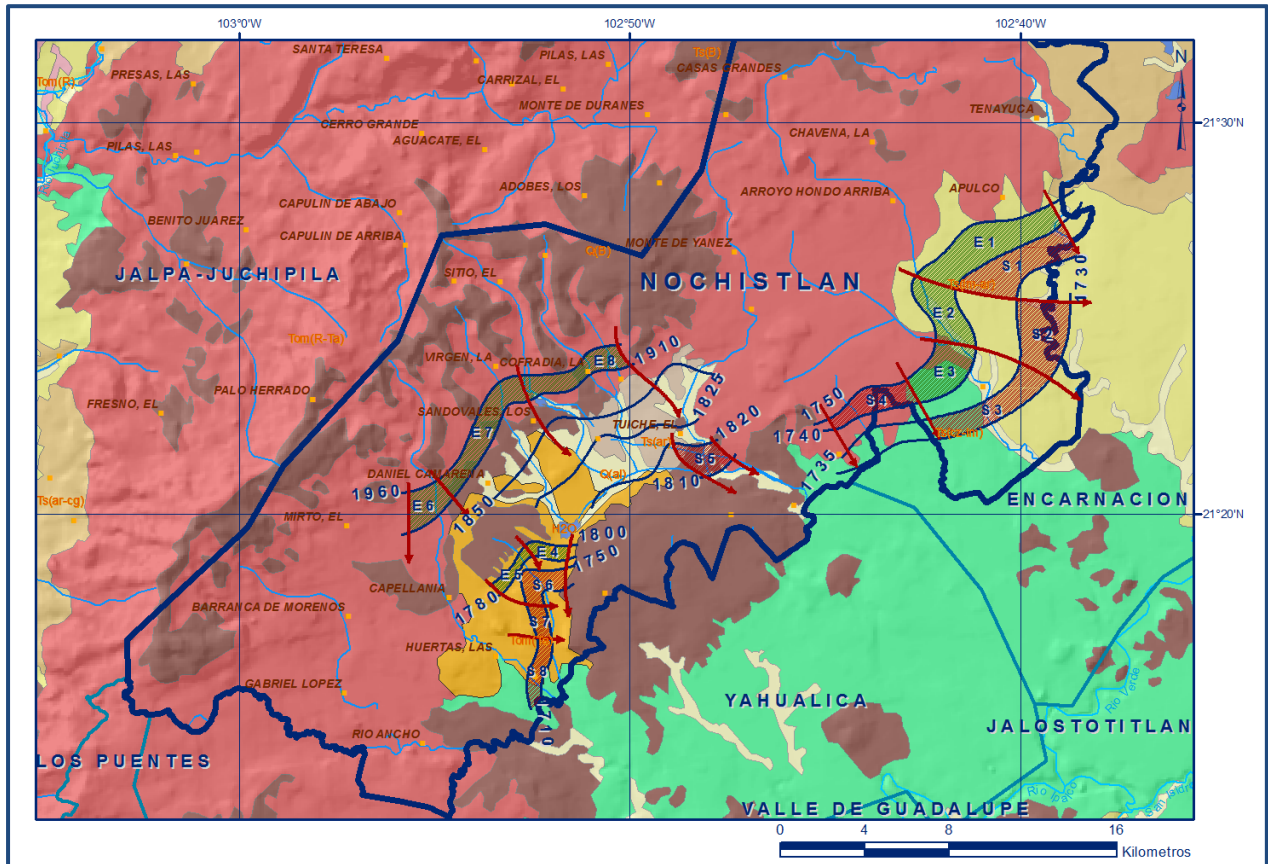


Figura 5. Elevación del nivel estático 2018

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2018 registró valores locales de abatimiento, que varían de 1 a 6 m, que representa 0.1 a 0.6, con valores puntuales de 8 m (0.8 m anuales), y se observaron en la zona ubicada entre las localidades Daniel Camarena y La Cofradía, El Molino y Las Huertas, y entre Apulco y La Estancia. En la mayor parte de las zonas de explotación no se registraron variaciones en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

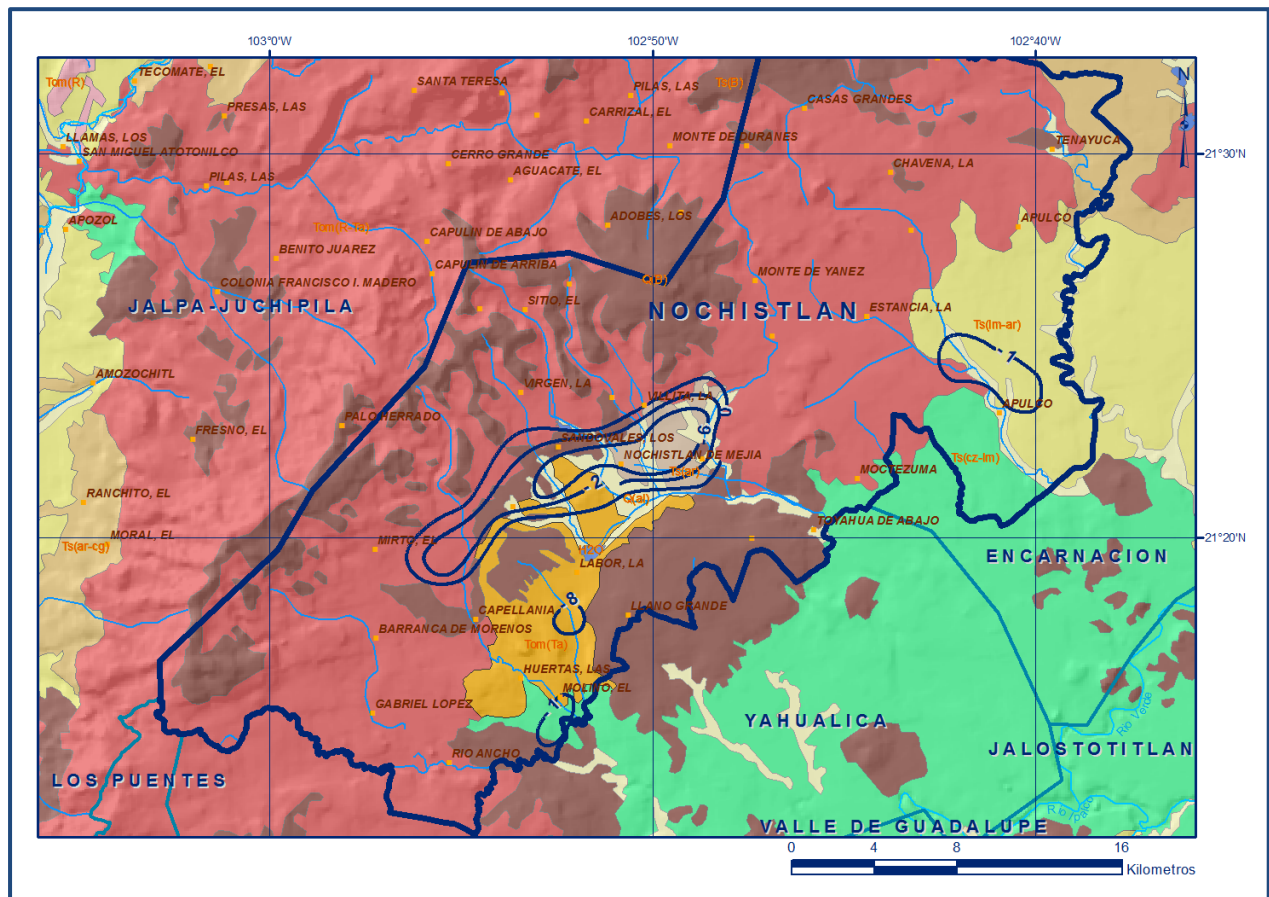


Figura 6. Evolución del nivel estático periodo 2008-2018

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2008, se tomaron 10 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones principales, potencial de hidrógeno (pH), compuestos nitrogenados, dureza total, alcalinidad y flúor. Así mismo se tomaron 4 muestras de agua subterránea en el año 2018, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018-2020), para estas muestras 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 los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD variaron de 94 a 350 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por 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. 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 son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presentan valores extremos de 170 a 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran hacia las zonas de recarga y se incrementan en dirección al suroeste, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Los parámetros cuyas concentraciones superan el límite máximo permisible (LMP), establecido en la norma referida, son nitratos, coliformes fecales y fluoruro. La concentración de nitratos fue mayor al límite máximo permisible (LMP) que establece la norma referida; la concentración de coliformes fecales en una muestra tomada en el año 2018 es de 10 NMP/100ml, mientras que el LMP es no detectable; la concentración de fluoruro en las cuatro muestras tomadas en el año 2018 varía de 4.45 a 5.27 mg/l, por lo que rebasan el LMP de 1.5 mg/l establecido por la norma referida, para el agua destinada al consumo humano.

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 del agua que predominan son bicarbonatada-cálcica y bicarbonada-sódica, que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas y calcáreas que constituyen las principales zonas de recarga.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la totalidad de las muestras de agua se clasificaron como C2S1, que representa agua de salinidad media 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 llevado a cabo en el año 2008 y complementada con información 2017 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), se tienen registradas un total de 206 obras que aprovechan el agua subterránea, 113 son pozos, 75 norias y 18 manantiales; de las cuales 197 están activas y 9 se consideran inactivas. De las obras activas, 49 se destinan al uso agrícola, 75 son para uso público-urbano, 44 tienen un uso múltiple, 7 son pecuario, 2 para uso doméstico, y 2 más industrial. Se incluye en el censo la existencia de 18 manantiales en los que predomina el uso público urbano.

El volumen de extracción asciende a **7.5 hm³ anuales**, de los cuales 4.1 hm³ (54.7 %) son para uso agrícola, 2.5 hm³ (33.3 %) se destinan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.5 hm³ (6.7 %) para uso pecuario, y el restante 0.4 hm³ (5.3 %) se dedica al suministro de los usos doméstico, industrial y acuícola. Adicionalmente, a través de los **18 manantiales** identificados se descarga un caudal conjunto estimado de 16 lps, que equivalen a **0.5 hm³ anuales**, para usos múltiples.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2008-2018, en una superficie de **207 km²**, que corresponde a la superficie del valle donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que los volúmenes de agua para uso público-urbano y agrícola son pequeños, se considera, para fines del balance de aguas subterráneas, que no existe recarga incidental.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

$$Rv + Eh - B - Sh - ETR - Dfb - Dm = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- Rv** = Recarga vertical
- Eh** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B** = Bombeo
- Sh** = Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR** = Evapotranspiración
- Dfb** = Descarga por flujo base de ríos
- Dm** = Descarga de manantiales
- $\Delta V(S)$** = Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas y poros de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, 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.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2018 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

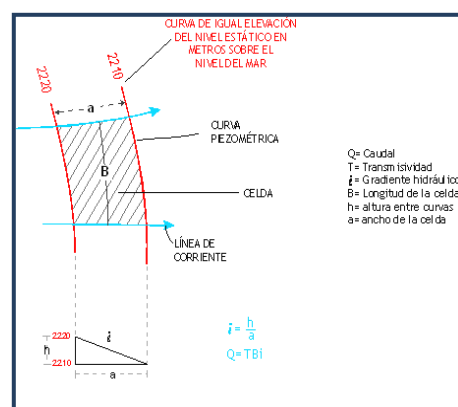
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

I = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **13.4 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2018)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	6500	1900	10	0.0053	0.0010	0.034	1.1
E2	2900	1550	10	0.0065	0.0015	0.028	0.9
E3	3200	1800	10	0.0056	0.0005	0.009	0.3
E4	1680	700	20	0.0286	0.0008	0.038	1.2
E5	2300	350	20	0.0571	0.0005	0.066	2.1
E6	1900	1600	50	0.0313	0.0008	0.048	1.5
E7	6100	1100	50	0.0455	0.0002	0.055	1.7
E8	4700	810	50	0.0617	0.0005	0.145	4.6
TOTAL						13.4	

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, es este acuífero y otros vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) por evapotranspiración (ETR) en la zona de niveles freáticos someros, por flujo base (Dfb) y a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **7.5 hm³ anuales**.

7.2.2 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 del 2018, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **5.6 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2018)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	4650	1280	10	0.0078	0.0010	0.036	1.1
S2	3250	2130	5	0.0023	0.0010	0.008	0.2
S3	5350	1000	5	0.0050	0.0002	0.005	0.2
S4	4000	1000	10	0.0100	0.0005	0.020	0.6
S5	1600	1450	10	0.0069	0.0030	0.033	1.0
S6	2450	1200	40	0.0333	0.0003	0.025	0.8
S7	1400	680	40	0.0588	0.0002	0.016	0.5
S8	3100	680	40	0.0588	0.0002	0.036	1.2
TOTAL							5.6

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro 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 Evapotranspiración Real).

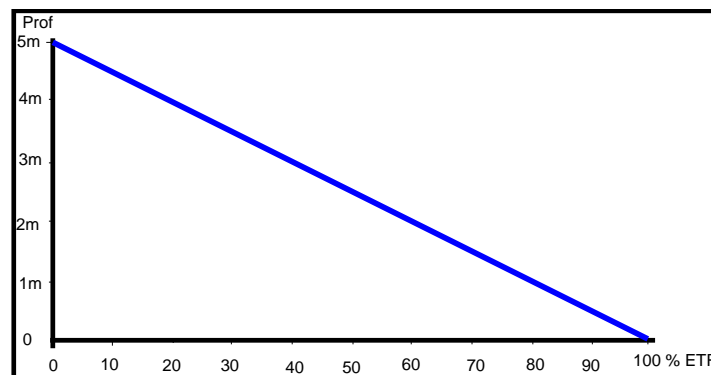
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de las tres estaciones mencionadas, 17.6°C y 648.9 mm, respectivamente, obteniéndose una lámina de evapotranspiración de **566.8 mm anuales**, como se muestra a continuación:

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

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	17.6		
P(mm) =	648.9	P ² =	421071.21
L =	1012.5888	L ² =	1025336.08
ETR (mm)	566.8		

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 evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en

cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 0.6 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2018)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3	3	2.8	0.5668	0.4	0.6
	Total	2.8		Total	0.6

7.2.4 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 18 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 16 lps, que representan un volumen anual de **0.5 hm³**.

7.2.5. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de aforos, proporcionada por la Dirección Local en Zacatecas, el Río Nochistlán presentó un caudal estimado de 298 lps de flujo base, en el estiaje del periodo 1980-2007, que representan un volumen de **9.4 hm³ anuales**.

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 registrada durante el periodo 2008-2018 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.02, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

H = Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El volumen de cambio de almacenamiento en el intervalo 2008–2018, fue de -4.1 hm³, que representa un promedio anual de - **0.4 hm³** (tabla 5).

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2008-2018)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-1	-1	11.9	0.02	-0.2
-8	-8	1.4	0.02	-0.2
-6	-6	13.4	0.02	-1.6
-2 a -6	-4	21.7	0.02	-1.7
0 a -2	-1	21.8	0.02	-0.4
	TOTAL	70.2	TOTAL	-4.1
	Promedio anual			-0.4

Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned}
 R_v &= B + Sh + ETR + Dfb + Dm + \Delta V(S) - Eh \\
 R_v &= 7.5 + 5.6 + 0.6 + 9.4 + 0.5 - 0.4 - 13.4 \\
 R_v &= 9.8
 \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual está definida por la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned}
 R &= R_v + Eh \\
 R &= 9.8 + 13.4 \\
 R &= 23.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **23.2 hm³ anuales**, de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero, su valor es de **15.5 hm³ anuales**, de los cuales 0.5 hm³ corresponden a la descarga de los manantiales, 9.4 hm³ al flujo base del río Nochistlán y 5.6 hm³ a las salidas subterráneas que se producen hacia los acuíferos Yahualica y Encarnación, del estado de Jalisco.

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 (REPD), 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 **9'465,479 m³ anuales**, que reporta el que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 23.2 - 15.5 - 9.465479 \\ \text{DMA} &= - 1.765479 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de **1'765,479 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2005. Actualización hidrogeológica del acuífero Jalpa-Juchipila, Zacatecas. Realizado por Consultoría BETSCO S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico y calidad del agua de los acuíferos Nochistlán y Tlaltenango-Tepechitlán, en el estado de Zacatecas. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2010. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Nochistlán, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Piezometría histórica del acuífero Nochistlán, Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en las zonas de Tlaltenango-Juchipila, estado de Zacatecas. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera Aguascalientes F13.9. Escala 1:250,000.