



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ESPÍRITU SANTO (3232), 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..... | 5 |
| 3.1 Provincia fisiográfica..... | 5 |
| 3.2 Clima..... | 6 |
| 3.3 Hidrografía | 7 |
| 3.4 Geomorfología | 8 |
| 4. GEOLOGÍA..... | 8 |
| 4.1 Estratigrafía..... | 10 |
| 4.2 Geología estructural | 17 |
| 4.3 Geología del subsuelo | 18 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA..... | 19 |
| 5.1 Tipo de acuífero | 19 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos..... | 20 |
| 5.3 Piezometría | 20 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico | 21 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático | 21 |
| 5.4.2. Elevación del nivel estático..... | 22 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático | 22 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea..... | 23 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA | 24 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS | 25 |
| 7.1 Entradas | 25 |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv)..... | 26 |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)..... | 26 |
| 7.2 Salidas..... | 27 |
| 7.2.1 Bombeo (B) | 28 |
| 7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) | 28 |
| 7.2.3 Evapotranspiración (ETR)..... | 28 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)..... | 30 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 31 |
| 8.1 Recarga total media anual (R) | 31 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC) | 32 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)..... | 32 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 32 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 34 |

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 Espíritu Santo, definido con la clave 3232 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 22°18'18" y 22°44'57" de latitud norte y entre los meridianos 101°17'11" y 101°40'43" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,120 km². Limita al norte con el acuífero Santo Domingo, al noreste y este con Villa de Arista; al noroeste y oeste con Salinas de Hidalgo; y al sureste con Ahualulco; del estado de San Luis Potosí. Al sureste con el acuífero Saldaña, al sur con los acuíferos Pinos y Pino Suarez; al suroeste con Villa Hidalgo; todos estos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1).

Geopolíticamente, la mayor parte del territorio que comprende el acuífero pertenece al municipio Pinos, y una porción pequeña al municipio Villa Hidalgo

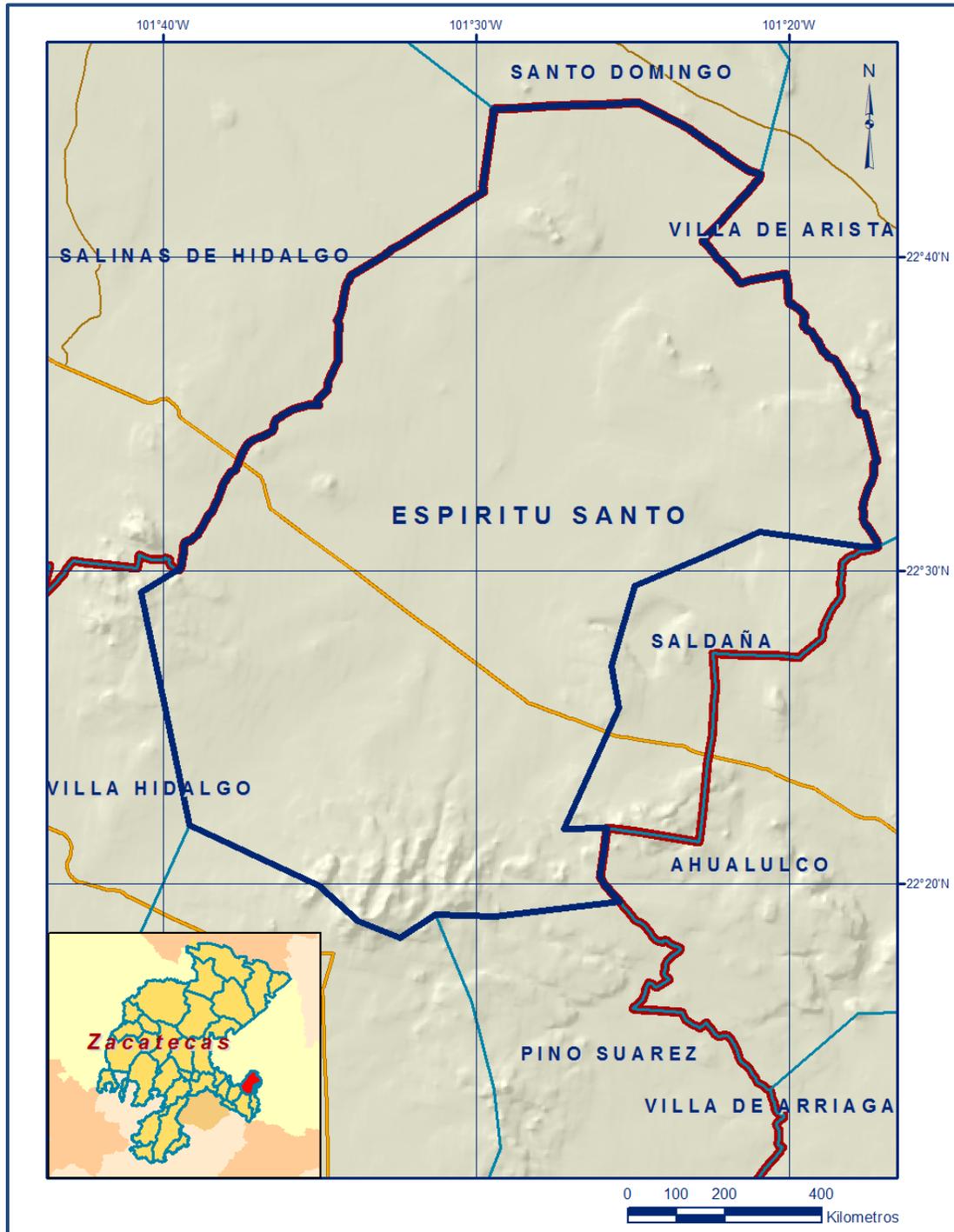


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUÍFERO 3232 ESPIRITU SANTO

| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
|---------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|------------------------------------|
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 101 | 29 | 26.5 | 22 | 44 | 44.0 | DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 2 | 101 | 20 | 56.0 | 22 | 42 | 37.7 | DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 3 | 101 | 17 | 11.1 | 22 | 30 | 46.1 | |
| 4 | 101 | 17 | 38.9 | 22 | 30 | 45.3 | |
| 5 | 101 | 20 | 57.1 | 22 | 31 | 13.9 | |
| 6 | 101 | 22 | 49.2 | 22 | 30 | 23.8 | |
| 7 | 101 | 24 | 56.1 | 22 | 29 | 30.5 | |
| 8 | 101 | 25 | 41.2 | 22 | 26 | 57.1 | |
| 9 | 101 | 25 | 26.1 | 22 | 25 | 36.2 | |
| 10 | 101 | 27 | 11.2 | 22 | 21 | 45.5 | |
| 11 | 101 | 25 | 49.6 | 22 | 21 | 46.7 | DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 12 | 101 | 25 | 25.3 | 22 | 19 | 26.6 | |
| 13 | 101 | 29 | 23.7 | 22 | 18 | 56.6 | |
| 14 | 101 | 31 | 17.6 | 22 | 19 | 0.3 | |
| 15 | 101 | 32 | 25.5 | 22 | 18 | 16.7 | |
| 16 | 101 | 33 | 45.8 | 22 | 18 | 48.1 | |
| 17 | 101 | 35 | 1.1 | 22 | 19 | 56.1 | |
| 18 | 101 | 39 | 8.7 | 22 | 21 | 51.6 | |
| 19 | 101 | 40 | 41.9 | 22 | 29 | 18.5 | |
| 20 | 101 | 39 | 32.5 | 22 | 30 | 0.3 | DEL 20 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 1 | 101 | 29 | 26.5 | 22 | 44 | 44.0 | |

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Espíritu Santo pertenece al Organismo de Cuenca VII Cuencas Centrales del Norte, al Consejo de Cuenca “Altiplano”, instalado el 23 de noviembre del 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Zacatecas. Su territorio completo 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 los Municipios de Noria de Ángeles, Pinos, etc., ubicados en el Estado de Zacatecas”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 9 de febrero de 1978. Esta veda es de tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, 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 LA REGIÓN DE PINOS, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la empresa

Técnicos Asesores y Constructores S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos, en el año 1981.

Comprendió una superficie aproximada de 5000 km², incluyendo a los acuíferos Pinos, Espíritu Santo, Pino Suárez y Saldaña. Su objetivo principal fue definir las estructuras y unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea y localizar áreas favorables para la perforación de pozos exploratorios. Entre sus actividades de campo más importantes destacan el censo de aprovechamientos de aguas subterráneas, muestreo de agua, interpretación fotogeológica e hidrogeológica con verificación de campo y exploraciones geofísicas. Concluye la existencia de un acuífero principal, ubicado en los materiales clásticos del cuaternario, conformado por conglomerados poco cementados y rellenos aluviales. Recomienda áreas favorables para la perforación de pozos.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DE AGUA, EN LOS ACUÍFEROS DE: GUADALUPE DE LAS CORRIENTES, PUERTO MADERO, VILLA HIDALGO, PINOS Y ESPIRITU SANTO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2010.

Los trabajos contemplaron actualizar el conocimiento del flujo subterráneo y mediciones piezométricas en pozos de la red de monitoreo para elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea. Consideró además la nivelación de brocales y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico; con la información generada se determinó que el abatimiento promedio anual para el periodo 1981-2010 fue de 0.18 m.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO ESPÍRITU SANTO, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2017.

Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio 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 con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica totalmente dentro de la provincia fisiográfica Mesa Central. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la provincia fisiográfica Mesa del Centro, la mayor

parte en la subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, y el extremo sur se localiza en la subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

La Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m. En la subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas dominan extensos terrenos áridos con lomeríos en la porción noreste y sierras bajas en la región sureste. En la región suroccidental existen dos llanuras aluviales de extensión considerable, pero lo que caracteriza a esta subprovincia, especialmente a su porción occidental, es la gran llanura desértica que se extiende en territorio del límite entre los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, con piso de caliche, que se localiza a una altitud promedio de 2,000 msnm. La subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes se caracteriza por sus extensas llanuras con pisos de caliche y una muy somera cubierta aluvial, que se encuentran a altitudes alrededor de los 2,000 m. Su expresión principal es la de llanura desértica de piso rocoso, seguida por los sistemas de topoformas lomerío con cañadas, sierra baja, sierra baja con mesetas y meseta.

En el área, los rasgos fisiográficos que predominan son bajadas aluviales, donde se acumularon depósitos aluviales, lacustres y tobas de granulometría variable; se observan también pequeñas mesetas y cerros relictos, que se presentan de manera aislada dentro de las bajadas aluviales. Estas unidades se encuentran delimitadas, en su porción sur, por lomeríos con bajadas y sierras altas con mesetas.

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 totalidad de la superficie del acuífero prevalece el clima semiárido templado BS₁kw, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

El clima seco estepario (BS) corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (i), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes

más frío y del más cálido, templado con verano cálido. El régimen de lluvia (w), define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Espíritu Santo, Pino Suarez, Pinos, Villa Hidalgo y El Rucio. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1947-2016 y el más corto 1980-2016, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de **394.9 mm, 16.3 °C y 2018.5 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de total estiaje ocurre de marzo a mayo, la región presenta heladas en un rango de 20 a 40 días por año y condición de canícula.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 37 “El Salado”, en la cuenca “San Pablo y Otras”. En el área no existen corrientes superficiales importantes, únicamente pequeños arroyos de régimen intermitente; la mayoría de los arroyos que descienden de las planicies montañosas por lo general desaparecen en la llanura. El drenaje es hacia el centro de la cuenca, para continuar en forma no muy definida con dirección norte. La zona representa una cuenca cerrada, que comprende parte de los estados de Zacatecas y San Luis Potosí. La Región Hidrológica El Salado es una de las vertientes interiores más importantes del país, se localiza en la altiplanicie septentrional y la mayor parte de su territorio se sitúa a la altura del Trópico de Cáncer. Todo este conjunto hidrográfico está constituido por una serie de cuencas cerradas, de muy diferentes dimensiones.

La infraestructura para el aprovechamiento del agua superficial está representada por las pequeñas presas El Rosario, ubicada en la porción norte, y La Pendencia, localizada al suroeste; ambas tienen una capacidad de almacenamiento de 1.0 hm³. Otras presas de menor capacidad son Salitrillo, El Saucillo, El Zacatal, San José, San Diego, Ahijaderos, Cardenas y San Andres; que suman una capacidad de almacenamiento de 1.9 hm³.

3.4 Geomorfología

El desarrollo del ciclo geomorfológico de la región, es el resultado de una serie de eventos tectónicos que modelaron el área, levantando primero el relieve al manifestarse los efectos de los diferentes eventos orogénicos; y posteriormente degradada bajo los efectos de los agentes erosivos, hasta llegar a conformar el aspecto actual, que se caracteriza por un paisaje de cuencas cerradas, producto de la fragmentación en bloques del terreno después de la Orogenia Laramide, que posteriormente fueron rellenadas por material clástico en los diferentes intervalos comprendidos desde el Cenozoico al Reciente. Estas cuencas fueron delimitadas por bloques positivos de elevación media a baja constituidos por derrames de lava y tobas de composición riolítica. Los lomeríos que se observan, están constituidos por areniscas y lutitas plegadas. Las mesetas de cimas planas y alargadas están constituidas por riolitas, tobas arenosas e ignimbritas.

En la zona las elevaciones varían de 1937 msnm presentes en la porción norte, a 2985 msnm de la porción sur, estas elevaciones máximas se presentan en la Sierra de Pinos, la cual está alargada en dirección norte-sur. El desnivel de 1048 m en una distancia muy corta provoca que los escurrimientos desciendan rápidamente a la planicie aluvial en época de lluvias. La Sierra Peñón Blanco, se ubica en el extremo oeste del acuífero, tiene una orientación NW-SE y presenta elevaciones cercanas a los 3000 msnm. Al norte se localiza un grupo de cerros entre los que destacan Los Salteadores, Las Cabras, La Loba y Pinto; al noreste se ubican los cerros La Campanita, la Loma de en Medio, Las Mesas y Loma Cerrito Alto. De acuerdo a lo anterior, la zona corresponde a un llano circundado por lomeríos y mesetas de poca elevación, característico de un ciclo geomorfológico de madurez.

4. GEOLOGÍA

El marco geológico regional de la zona en la que se ubica el acuífero está representado por los eventos relacionados con el establecimiento de la Sierra Madre Occidental y la evolución del Terreno Guerrero, que fue definido por Campa et al. (1983), que presentan características litoestratigráficas diferentes. De esta manera, del Terreno

Guerrero se presentan unidades metamorfizadas de edad Cretácico, y unidades de origen volcánico del Cenozoico pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Completan la columna unidades de edad cuaternaria que consisten en basaltos y materiales aluviales.

A nivel regional se presentan tres ambientes geológicos bien definidos: el Terreno Guerrero, la Cuenca Mesozoica del Centro de México y la Plataforma Valles-San Luis Potosí. En la porción occidental de la zona el Terreno Guerrero, está representado por una secuencia de meta-basaltos y filitas muy deformados y posiblemente con repetición estructural, conocida como Formación Chilitos de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

La estratigrafía de la Cuenca Mesozoica del centro de México es la siguiente: la base de la columna presenta una secuencia de esquistos y filitas conocida como Formación Zacatecas; de edad Cárnico inferior de acuerdo a la fauna reportada, está expuesta en la porción centro-occidental de la carta. Del Jurásico aflora una secuencia calcárea marina depositada en un ambiente nerítico de aguas tranquilas, perteneciente a la Formación Zuloaga, sobreyacida concordantemente por una secuencia calcárea depositada en un ambiente de escasa energía correspondiente a la Formación La Caja. Del Cretácico existen pequeños afloramientos de la Formación Taraises, constituida por una alternancia de caliza y lutita que descansan, de manera en forma concordante y transicional, sobre La Formación Cupido constituida por una alternancia de calizas y lutitas. Descansando transicionalmente la Formación La Peña, de edad aptiana, consiste de calizas arcillosas y lutitas. Distribuida en la porción central de la región se observa la Formación Cuesta del Cura constituida por una secuencia de calizas y lutitas de edad Albiano-Cenomaniano, que subyace por relación concordante y transicional a la Formación Indidura la cual está constituida por una alternancia de caliza y lutita de edad Turoniano depositada en agua tranquila poco profunda; encima transicionalmente se tiene a lutitas y areniscas de la formación Caracol de edad del Coniaciano al Maestrichtiano (Carta Geológico-Minera San Luis Potosí F14-4. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

Durante el Cenozoico en el occidente de México se presentó la influencia de un arco magmático generado por la tectónica convergente, dando lugar a la emisión de rocas volcánicas que conforman la Sierra Madre Occidental. Mc Dowell et al. (1979) establece que la sierra está constituida por dos secuencias ígneas: Una inferior que consta principalmente de rocas ígneas intermedias con edades que varían de 45 a 95 Ma (Paleoceno) y que corresponden con derrames, flujos piroclásticos y algunas

intercalaciones de flujos ignimbríticos. La secuencia superior y más reciente está integrada por una potente cubierta de ignimbritas que de acuerdo con Demant et al. (1975) puede alcanzar 1000 m de espesor, cuya edad se considera entre 27 y 34 Ma (Oligoceno). En el Cenozoico también se deposita discordantemente un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos de calizas y rocas volcánicas, con espesor de 130 m.

Algunos intrusivos de composición granítica afectan a las unidades de las columnas antes descritas. Sobreyaciendo a los conglomerados se depositaron derrames de composición andesítico del Eoceno, sobreyaciéndola se tiene una secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno, constituidas por brecha volcánica andesítica, derrames riolíticos, riodacíticos, andesíticos, dacíticos, latíticos, tobas riolítica, e ignimbritas que han sido fechadas por el método radiométrico K/Ar entre 30.6 ± 5 y 29.0 ± 1.5 m.a. Del Neógeno se tiene un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados de areniscas y rocas volcánicas de composición riolítica, areniscas y limos semiconsolidados. Al Cuaternario corresponden gravas y boleos no consolidados, basaltos con xenolitos de granulita y tobas basálticas. Cubriendo a todas las formaciones, en zonas muy extensas se depositaron aluviones con diversas granulometrías, producto erosivo de las rocas preexistentes (figura 2).

4.1 Estratigrafía

Debido a la existencia de diferentes ambientes geológicos, la estratigrafía del área presenta diferencias notables en conformación. Por esta razón la descripción de las unidades se realiza de manera separada por elemento.

Terreno Guerrero

Jurásico-Cretácico Inferior

Formación Chilitos

Término informal propuesto por De Cserna (1972) para denominar a una secuencia vulcanosedimentaria conformada por lavas masivas y almohadilladas de composición basáltica-andesítica, con intercalaciones de rocas sedimentarias, vulcanoclásticas y calcáreas, metamorfizadas en facies de esquistos verdes, que cabalgan a la Formación Zacatecas, cuya edad tentativamente se le asignó al Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Esta unidad es la principal receptora de los yacimientos de oro, plata y polimetálicos.

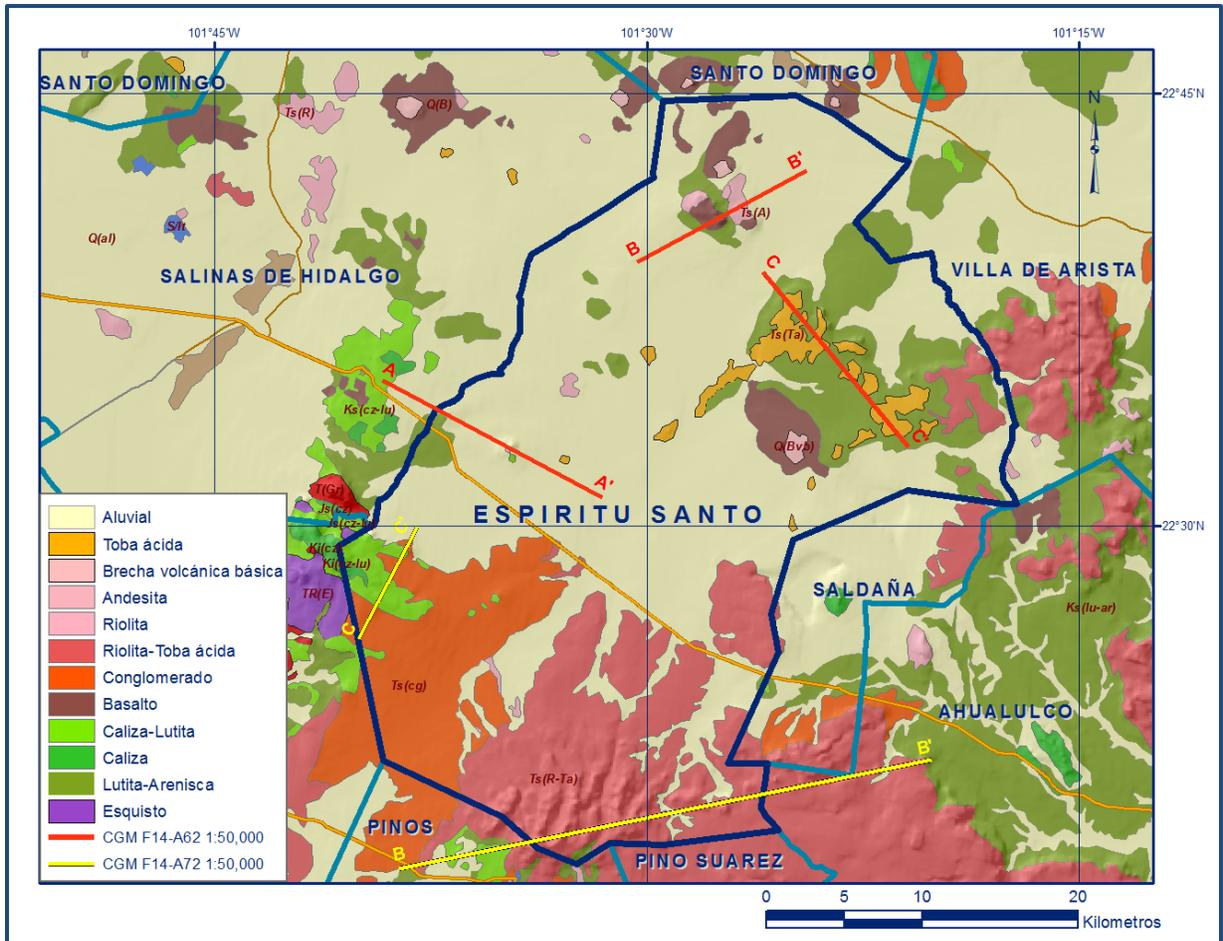


Figura 2. Geología general del acuífero

Cuenca Mesozoica del Centro de México

Triásico Superior

Formación Zacatecas

Nombre con el que Carrillo Bravo (1971) se refirió a una secuencia de filitas y metalutitas sericitizadas con nódulos de cuarzo, metaareniscas, metatobas, metaconglomerados y metacalizas, interestratificadas con filitas, sobre las cuales sobreyace transicionalmente metalavas de composición andesítico-basáltica; todas ellas con metamorfismo de facies de esquistos verdes, que afloran al noroeste y sureste de la ciudad de Zacatecas. Con base en los restos fósiles, Burckhardt, 1906 y Scalia, 1906, la dataron en el Triásico Superior.

Litológicamente está constituida por intercalaciones de estratos delgados de filitas, pizarras, capas gruesas y medias de cuarcitas y calizas. Las filitas son de color gris verdoso, con algunas tonalidades ocasionadas por el contenido de hematita diseminada; en lo que respecta a las pizarras, en ocasiones se encuentran silicificadas,

son de color verde y se encuentran alternando con horizontes arcillosos. Las cuarcitas son de color gris rosáceo amarillento, muy compactas; las calizas se presentan en forma de cuerpos lenticulares, de color gris y se encuentran recristalizadas. En las cuarcitas y filitas en ocasiones se presentan lentes de cuarzo lechoso, seguramente producto de los procesos hidrotermales. En los trabajos consultados no se tiene reportado el espesor de la unidad, por lo que se asume que su potencia corresponde con los 1,000 m que le asignó Mc Ghee en 1977. La base de la unidad no se observa, en tanto que su contacto superior con la Formación Chilitos es tectónico (Centeno, 1997). La edad estimada para esta formación es del Triásico Superior. Su depósito se considera que ocurrió en un ambiente marino marginal.

Triásico-Jurásico

Formación Nazas

Término formacional utilizado inicialmente por Pantoja (1963) para describir un conjunto de materiales vulcanosedimentarios cuya localidad tipo se encuentra en el Anticlinorio de Villa Juárez, sobre el Río Nazas. Es la unidad más antigua de la región y está representada por una serie de lavas antiguas interestratificadas con lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, que presentan muy baja permeabilidad y que funcionan como basamento geohidrológico de la cuenca. Consta de lutitas, limolitas y areniscas rojas, en ocasiones conglomeráticas. Los estratos más delgados son laminares hasta de 15 cm de espesor y corresponden a las lutitas y limolitas, en tanto que los derrames de lava y las areniscas, presentan horizontes masivos que superan el metro de espesor.

Por sus características litológicas, se asocia a un depósito de tipo "molasse", que rellenó las fosas tectónicas producidas en la fase post-orogénica (tafrogénica) de la Orogenia Apalacheana; en un ambiente continental con intensa actividad volcánica, fallamiento en bloques y erosión intensa de las estructuras producidas durante la fase compresiva, el cual estuvo asociado a un vulcanismo de composición calcoalcalino relacionado con la apertura del Golfo de México.

Jurásico Superior

Formación Zuloaga

Está representada por una caliza resistente a la erosión que forma los núcleos de los anticlinales en la que se distinguen dos unidades bien definidas: la parte inferior que contiene capas de caliza, cuyo color varía de gris claro a ligeramente oscuro, presenta una coloración rojiza o amarillenta al intemperismo, contiene también algunas capas de limolita calcárea débilmente consolidada. La parte superior está constituida por

caliza masiva de color gris, que se caracteriza por presentar estilolitas de gran amplitud y algunos horizontes donde se presentan pequeños nódulos de pedernal de color negro. Aflora en las sierras plegadas que rodean el llano. Su espesor aproximado es del orden de 500 m.

Formación La Caja

Consiste en capas delgadas de calizas margosas con pedernal, fosforitas, alternando con limolitas y areniscas bituminosas, que se hacen progresivamente más finas hacia la cima. Aflora en la mayoría de las sierras plegadas, generalmente en estrechas bandas paralelas que limitan a la Formación Zuloaga en los núcleos anticlinales. Debido a que es poco resistente a los agentes erosivos, frecuentemente se caracteriza porque en ella se desarrollan puertos y valles, que se alargan paralelamente al rumbo de las capas. A menudo se encuentra enmascarada por una pequeña cobertura aluvial, su espesor es del orden de 100 m. Sus contactos inferior y superior son, concordantes con las formaciones Zuloaga y Taraises, respectivamente.

Cretácico

Unidad Vulcanosedimentaria

En el área del acuífero se distinguen dos unidades de esta secuencia: la base está constituida por materiales vulcanosedimentarios depositados en un medio acuoso y la cima conformada por una secuencia de sedimentos clásticos que en gran parte se encuentran metamorfizado. Se correlaciona con los grupos Fresnillo y Noria de Ángeles (Espinoza, 1991), constituida por areniscas, filitas, calizas arcillosas, bancos calcáreos-dolomíticos y zonas de esquistos sericíticos, que sobreyacen discordantemente a la Formación Chilitos.

Formación Taraises

Está constituida de caliza con cantidades menores de limolita, que descansan sobre sedimentos arcillosos de la Formación La Caja. En las partes altas de las montañas plegadas que forma, las capas de caliza son de espesor mediano a grueso, densas y de color gris claro a oscuro. La limolita que contiene se presenta intercalada en proporciones variables. La Formación Taraises es un depósito que se llevó a cabo en aguas relativamente profundas, alcanza un espesor aproximado de 150 m. Aflora en forma de franjas delgadas de poco espesor en las sierras plegadas cuyos contactos, inferior y superior son concordantes con las formaciones La Caja y Cupido respectivamente.

Formación Cupido

Representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa de coloración gris claro, que presentan concreciones de pirita, lentes y nódulos de pedernal color gris y estilolitas; en algunas localidades con intercalaciones de limolitas calcáreas y en menor proporción lutitas. Sus mejores afloramientos se localizan en el Cañón Mimbres de la porción media de la Sierra de Parras, en Coahuila. Aflora principalmente en las sierras plegadas de la porción norte, en donde sus contactos estratigráficos con la unidad inferior, Formación Taraises, y superior, Formación La Peña y la Formación Cuesta del Cura, son concordantes. Su espesor promedio en esta área se ha estimado entre 350 y 500 m. Su depósito ocurrió en una plataforma lagunar de aguas someras y tranquilas, templadas a cálidas, con buena oxigenación y poca influencia de arcillas, lo que permitió el desarrollo y crecimiento de abundantes organismos.

Formación La Peña

Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca. En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada. Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte guía ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido. Sus afloramientos en el área del acuífero representan franjas de espesor reducido, asociadas a la Formación Cupido, a la cual sobreyace concordantemente. A su vez, es cubierta concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. Aflora en el área del acuífero, en la porción sur. Su espesor varía de unos cuantos metros hasta 100 m. El contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Cupido, mientras que su contacto superior es nítido y concordante con la Formación Cuesta del Cura. Su depósito ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, en aguas sensiblemente profundas, bajo condiciones tectónicas inestable, lo que ocasionó el aporte abundante de sedimentos clásticos finos.

Formación Cuesta del Cura

Secuencia de calizas compactas, de estratificación delgada y ondulada, con nódulos y bandas de pedernal e intercalaciones delgadas de arcilla, que aflora en la porción norte del área. La unidad consiste de calizas tipo "mudstone", dispuestas en capas que varían de 10 a 25 cm de potencia, cuyo espesor total es del orden de 200 a 300 m. La relación

con la Formación La Peña es por medio de contacto nítido, mientras que el contacto superior con los sedimentos calcáreos-arcillosos de la Formación Indidura es concordante. El depósito de esta unidad se llevó a cabo en una zona de mar abierto, en un ambiente de cuenca poco profunda.

Formación Indidura

Se encuentra constituida en general por una secuencia calcárea arcillosa, conformada por calizas arcillosas, en capas que van de 5 a 40 cm de potencia, con intercalaciones de calizas y lutitas calcáreas laminares. La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente erosionable, que, en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa. El espesor total promedio de la formación es de 200 m y aflora ampliamente en las cercanías de la localidad de Pinos. Sobreyace de manera concordante a la Formación Cuesta del Cura y subyace de igual manera la Formación Caracol. El depósito de esta unidad ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, con una aportación intermitente de clásticos pelíticos, bajo condiciones tectónicas inestables de relleno de cuenca.

Formación Caracol

Esta unidad está compuesta de areniscas de grano medio, con cementante calcáreo y matriz arcillosa, en capas de 20 cm de espesor, que muestran estratificación cruzada y turboglifos; intercaladas con limolitas y lutitas y ocasionalmente con margas. Las lutitas son moderadamente calcáreas y suaves, de color oscuro, localmente con ligero contenido de arena, mientras que la arenisca está bien consolidada y es resistente; está dispuesta en capas delgadas y gruesas que tienen colores gris pardo y verdoso. Se estima que su espesor puede alcanzar los 1000 m de potencia; en el área, el contacto inferior con la Formación Indidura es transicional y concordante; mientras que el superior está cubierto de manera discordante por materiales más recientes. Los afloramientos de esta formación se encuentran ampliamente distribuidos en toda el área.

Terreno Sierra Madre

Cenozoico Volcánico Riolítico

El paquete de rocas volcánicas que fueron eyectadas durante el Cenozoico está conformado por una gran diversidad de composiciones, predominando la riolítica asociada al Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, y únicamente hacia la base de la secuencia se presentan delgados horizontes andesíticos. A continuación, se presenta la descripción de las diferentes rocas volcánicas cenozoicas.

Ignimbritas

Esta unidad está ampliamente distribuida en la región ocupando diferentes niveles estratigráficos dentro de la secuencia volcánica cenozoica. Aflora en forma de cuerpos tabulares, conformando la morfología característica de mesetas o rellenando fosas y depresiones, son de color rosa grisáceo y rosa pardo que intemperizan a color pardo rojizo y pardo grisáceo. Generalmente presentan estructura de aspecto masivo con abundantes vesículas originadas por el escape de gases y fragmentos de pómez, así como bandeamiento que indica el flujo de las lavas. Afloran ampliamente en el área, en las sierras y mesetas que bordean el llano.

Riolitas

Agrupan flujos y estructuras dómicas formados por lavas de composición riolítica que se distribuyen en toda el área conformando los elementos topográficos de mayor elevación. Se presenta en forma de derrames de lava, de color rosa claro, en ocasiones con tonos pardos y rojizos, que al intemperismo muestran color pardo rosado o rosa grisáceo; con estructuras masivas y fluidal. Generalmente constituye domos y en donde presenta escarpes se desarrolla fracturamiento vertical que ocasiona la formación de columnas.

Formación Las Joyas

Fue definida por Labarthé et al. (1982) para referirse a las rocas del evento volcánico representadas por basaltos y tobas basálticas que afloran en la porción norte-centro de la zona y otros afloramientos de menores dimensiones ubicados al noreste. Se consideran depósitos de flujos y piroclastos que se caracterizan por formar derrames y constituir conos cineríticos como los cerros El Tezontle y San Cayetano. Contienen nódulos de herzolita y rocas metamórficas, como granulitas provenientes del manto. En algunas localidades cubre discordantemente a rocas de la Formación Caracol y tiene relaciones discordantes con depósitos continentales del Plioceno al Holoceno.

Conglomerado Polimíctico

Conglomerado formado por fragmentos angulosos a subredondeados de calizas y areniscas, comúnmente sin estratificación, ocasionalmente deleznable y mal clasificado, cuyo espesor no sobrepasa los 20 m. Aflora al suroeste del acuífero, en las cercanías de la localidad San Andrés. Descansa discordantemente sobre rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas. De acuerdo a su posición estratigráfica se le asigna la edad del Pleistoceno.

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 el llano y márgenes de ríos y arroyos; así como como por los depósitos residuales y de piedemonte. Litológicamente, los depósitos incluyen arenas de granulometría fina a gruesa, limos, arcillas, gravas y conglomerados mal cementados, bien a mal clasificados. Afloran ampliamente en toda la porción central del llano. Su espesor varía de 5 a 10 m y su edad corresponde al Holoceno.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente la región se caracteriza por presentar tres estilos de deformación bien definidos, el primero asociado a una zona de cizalla dúctil que se encuentra en el contacto entre el Terreno Guerrero y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Terreno Sierra Madre), el segundo presente en la parte central de la carta corresponde a plegamientos y cabalgaduras de escala decamétrica con convergencia al oriente, cuyos ejes presentan una orientación general noroeste-sureste y noreste-suroeste, el tercero se asocia a la Plataforma Valles-San Luis Potosí el cual es un sistema de pliegues y cabalgaduras con mecanismos de plegamiento tipo “bending”, producto de la Orogenia Laramide. Durante el Cenozoico principalmente en el Oligoceno-Eoceno se llevó a cabo el emplazamiento de cuerpos ígneos (stocks), originados por una fase distensiva con componente lateral izquierda que ocasionó fallas y grabens con orientación NW-SE.

En la porción occidental de la carta, grandes yacimientos como son el de Real de Ángeles y El Salvador se asocian a la superposición de las estructuras de la zona de cizalla del límite del Terreno de Guerrero y las estructuras de la fase transtensiva de posible edad oligocena. Por último se superpone una fase distensiva de posible edad pliocuaternaria a la que se asocian derrames de basaltos alcalinos (Carta Geológico-Minera San Luis Potosí F14-4, escala 1:250,000. SGM, 1998).

En la región de Espíritu Santo se identificaron estructuras que corresponden a proceso de deformación dúctil-frágil y frágil; del primer proceso se tienen anticlinales y sinclinales simétricos y asimétricos, así como cabalgaduras con orientación NW-SE y klippes; de los últimos, es posible que su origen se deba al mecanismo de retro cabalgadura, dada la cercanía a la zona de imbricación de los Terrenos Guerrero y Sierra madre. En general las estructuras relacionadas a la deformación dúctil-frágil, son originadas por mecanismos compresivos regionales ligados a la Orogenia

Laramide. La deformación frágil está representada por fallas y se asocia con los procesos distensivos post-laramídicos. La mayoría de los plegamientos tienen una orientación NW-SE y en menor proporción N-S. Las cabalgaduras presentan un patrón paralelo a la zona de imbricación de los Terrenos Guerrero y Sierra Madre.

El fallamiento es de tipo normal con dos patrones: el principal NE-SW y otro NW-SE. Regionalmente la principal estructura interpretada presenta una orientación NE-SW, que podría corresponder al “hombro” de una depresión o graben de mayores dimensiones. La deformación y características estructurales, así como la diferencia de composición litológica de los terrenos Guerrero y Sierra Madre, que reflejan diferentes ambientes depósito, indican un transponte tectónico importante del primer terreno, a partir del Cretácico Tardío, asociado al inicio de la Orogenia Laramide. Con este tipo de procesos, en los cuales se involucra la aloctonía de algunos de los terrenos tectonoestratigráficos identificados en México, generada por tectónica compresiva, produce la acreción o ensamble entre los diferentes terrenos (Carta Geológico-Minera Espíritu Santo F14-A62, escala 1:50,000. SGM, 2007).

El estilo de deformación de las unidades mesozoicas, observado al sur de la zona, en la región de Pinos, está controlado por una zona de cizalla frágil-dúctil, caracterizada por un intenso plegamiento isoclinal con desarrollo de una superficie de anisotropía, localmente plegada y crenulada; comportamiento asociado a las superficies de cabalgamiento. En la región noroccidental el estilo es más frágil y se manifiesta como apilamiento de cabalgaduras. Estos rasgos estructurales se asocian a la traza del límite entre los terrenos Sierra madre y Guerrero, la cual se infiere orientada NW-SE, coincidiendo en forma aproximada con el Campo Volcánico de Pinos. Este límite tectónico se extrapola al noreste hacia Villa de Ramos, y al sureste a Mineral de Pozos y el Cerro La Márgara, Guanajuato, que en el Cenozoico se manifiesta como una zona de debilidad cortical, que es afectado por estructuras de extensión, que se asocian a domos, “plugs” y vetas (Carta Geológico-Minera Pinos F14-A72, escala 1:50,000. SGM, 1999).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geofísica obtenida en estudios previos, los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y la correlación con acuíferos vecinos que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada y los conglomerados polimícticos que rellenan el valle tectónico.

sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros en el centro de la llanura; su espesor medio es del orden de 250 m. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas.

En el llano se pueden distinguir tres medios diferentes en los que circula el agua subterránea: El medio poroso con permeabilidad primaria y secundaria e intergranular y de fracturas, el medio fracturado con permeabilidad secundaria y el medio de doble porosidad con permeabilidad combinada, intergranular y de fracturas.

5.2 Parámetros hidráulicos

No existe información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. Sin embargo, se pueden adoptar los valores de 34 pruebas de corta duración en etapas de abatimiento y recuperación, realizadas en estudios previos en el acuífero vecino Villa Hidalgo, que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **3.5×10^{-5}** a **$45.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; si consideramos un espesor saturado promedio de 80 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **4.4×10^{-7}** a **$5.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** (**0.04** a **49.2 m/d**).

Adicionalmente, se cuenta con información de 15 aforos realizados en los últimos años, mediante los cuales se obtuvo el caudal específico (Q_e), como una estimación aproximada de la transmisividad (T), según la relación siguiente: $Q_e \text{ (lps/m)} \approx T (\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$. Los valores obtenidos varían de **0.01** a **1.11 lps/m**. Los valores mayores a 0.25 lps/m se presentan en la porción central, entre las comunidades Santiago, Trinidad Norte y El Salto, y los más bajos en la porción oriental, en las cercanías de la comunidad Tolosa.

Para el caso del rendimiento específico, atendiendo el tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de **0.07**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2010-2017, que es el que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En la mayor parte de la zona las profundidades al nivel estático son someras, predominan valores de 5 a 10 m. La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2017 mostró valores que variaban, de manera general, de 2 a 20 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el norte del valle, hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan. Los niveles estáticos más someros, menores de 5 m, se presentan en la porción norte, entre las comunidades El Salitrillo y Espíritu Santo, hacia la Laguna La Salinera en el acuífero vecino Santo Jose Domingo del estado de San Luis Potosí, y en los subálveos de los arroyos que descienden de la Sierra de Pinos; los más profundos, de 15 a 20 m, se registran hacia las sierras y mesetas que delimitan los valles. En la porción sur-sureste, en las cercanías de la comunidad La Pendencia, se observan valores profundos, del orden de 120 m (figura 4).

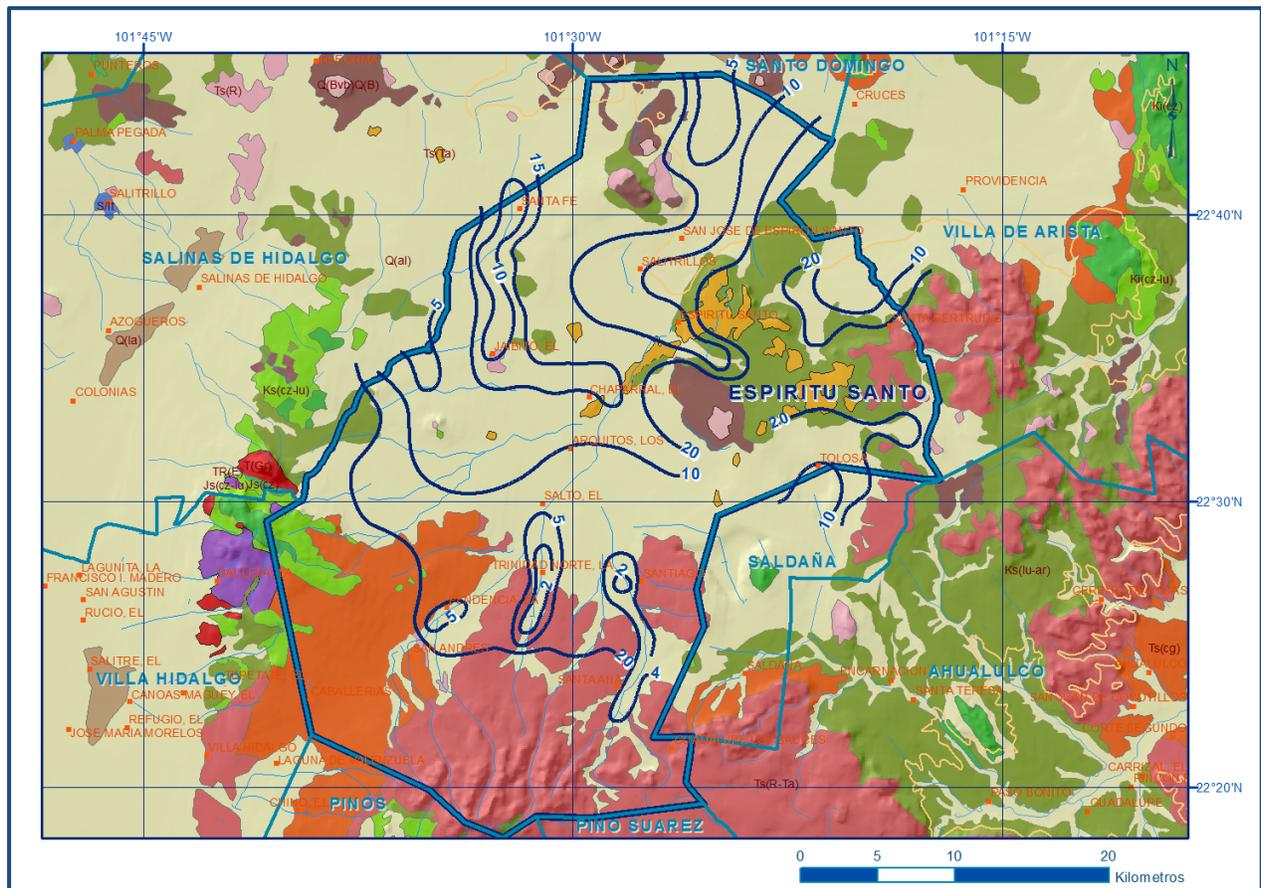


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2017)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2017 se registraron valores que variaron de 2,230 a 1,940 msnm, los cuales decrecen gradualmente, por efecto topográfico, al igual que las profundidades, desde la porción sur y suroccidental del acuífero hacia el valle aluvial localizado en la región central y norte, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo SW-NE, paralela a la red de escurrimiento superficial. Las menores elevaciones, de 1,940 a 1,960 msnm, se registraron en la porción norte del acuífero, en tanto que las mayores elevaciones, de 2,230 msnm, se presentan en la porción sur, en las cercanías de la comunidad San Carlos (figura 5).

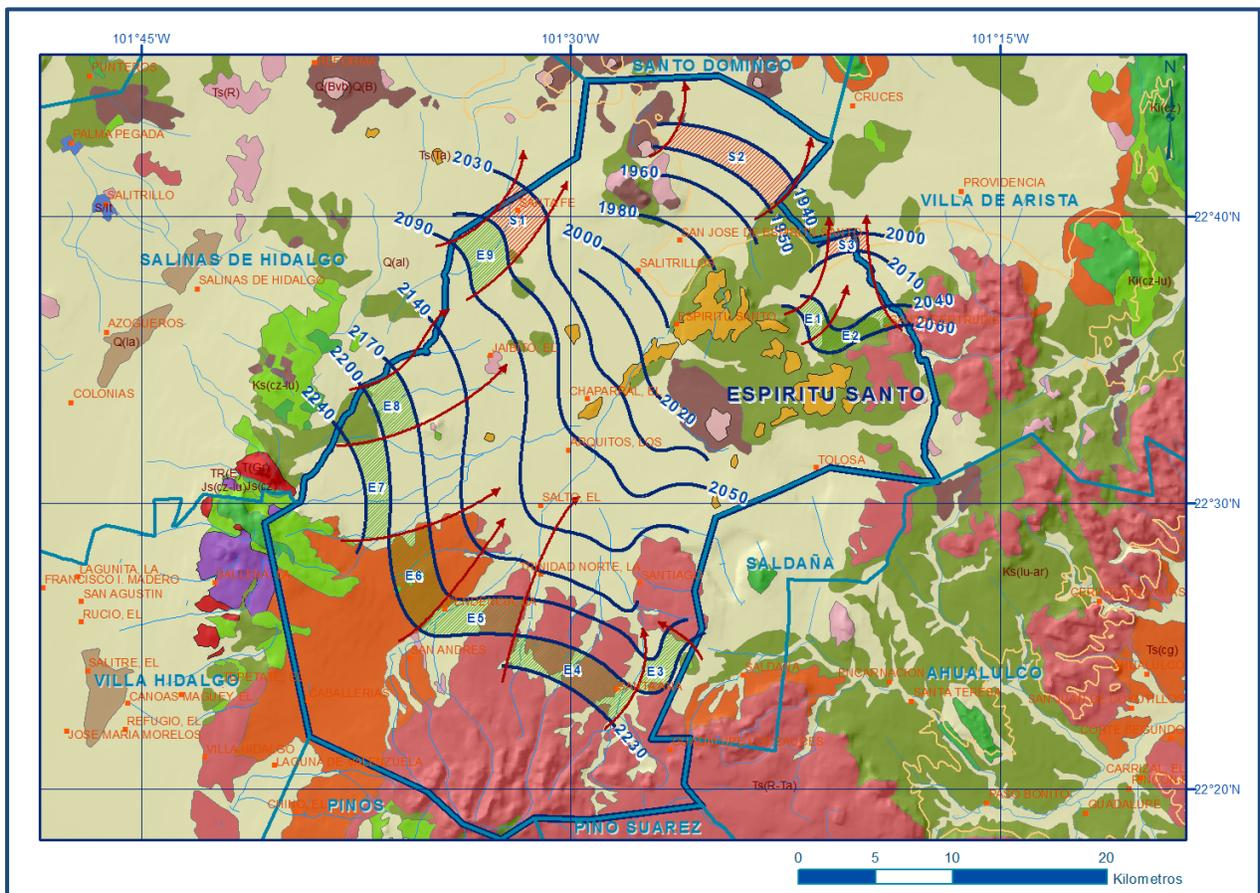


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2018)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2017 registró valores tanto de abatimiento como de recuperación. Los abatimientos varían de 1 a 2 m, es decir 0.1 a 0.3 m anuales, con valores puntuales de 4 m (0.6 m anuales) y se registran en la porción sur, en las inmediaciones de La Pendencia, al suroeste de El

Jaibito y en torno de la comunidad Santa Fe, ubicada en la región nororiental. Las recuperaciones variaron también de 1 a 2, con valores locales de 4 m, que representan valores 0.1 a 0.6 m anuales, y se observaron en la región central, entre los poblados Los Arquitos, El Chaparral, Espíritu Santo y El Jaibito. En la superficie restante de la zona de explotación, el ritmo de abatimiento promedio es de 0.1 m anuales que disminuye hasta desaparecer hacia las sierras limítrofes (figura 6).

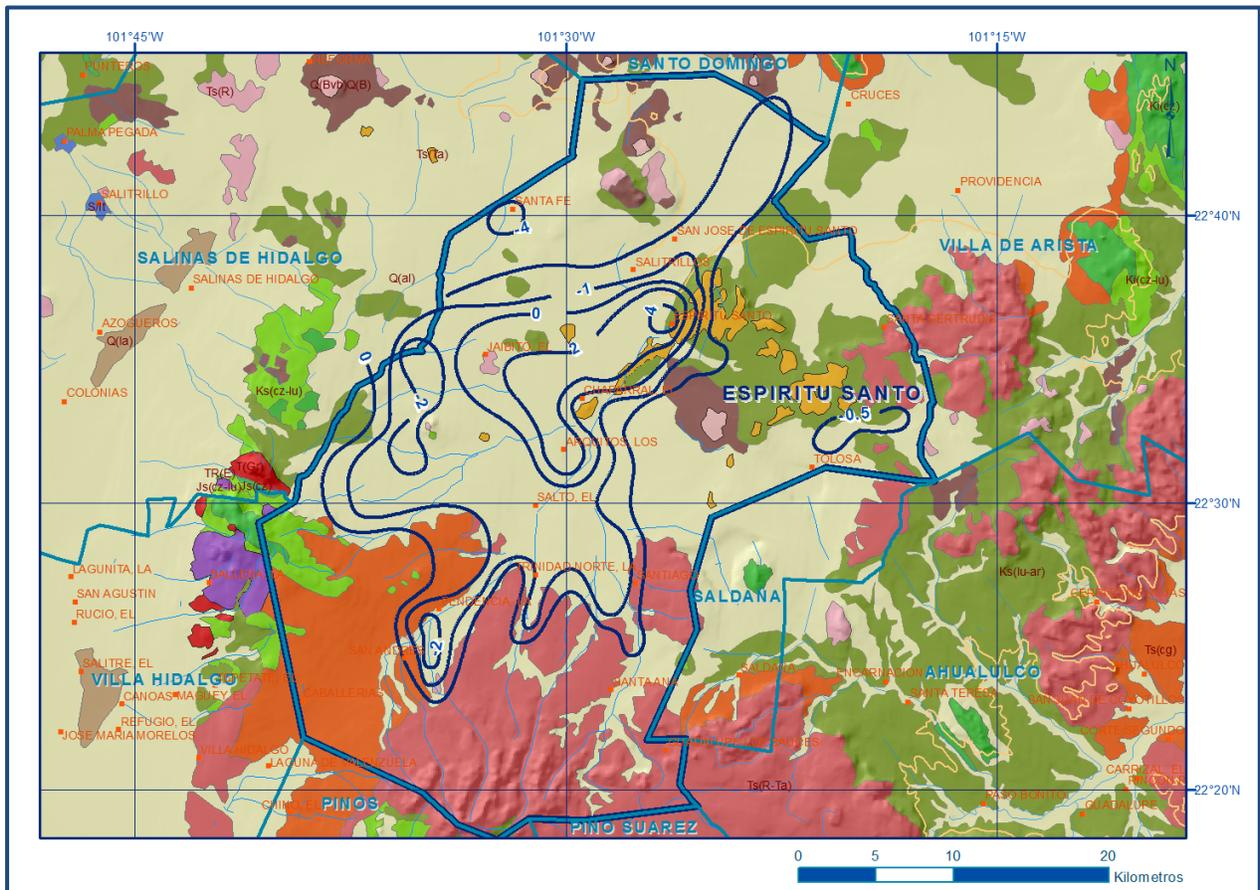


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2010-2017)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2010, 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 totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales. En cuatro de ellas se determinó la presencia de arsénico, flúor, mercurio y cianuro.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD varían de 194 a 390 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 387 a 786 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción norte y noroeste, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las temperaturas registradas varían de 19.1 a 31.5 °C en tanto que el pH medido fluctúa entre 7.3 a 9.0. Los parámetros que se encuentran fuera de norma, son el pH en 3 muestras y flúor en una muestra.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia de agua más abundante es la bicarbonatada-sódica en los 10 aprovechamientos analizados, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas ácidas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras de agua se clasifican como C_2S_1 , 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; solo una muestra presentó clasificación de agua con salinidad alta C_3S_1 , la cual también es apta para el riego agrícola, en cultivos más tolerantes a la salinidad y en suelos que requieren lavados periódicos.

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 y complementada con información 2017 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDa), se tienen registradas un total de 864 obras que aprovechan el agua subterránea, 30 son pozos, 832 norias y 2 manantiales; todas ellas están activas. De las obras, 486 se destinan al uso agrícola, 79 para uso público-urbano, 146 para uso doméstico, 43 para uso pecuario, 107 tienen un uso múltiple y 1 más para uso industrial. De los 2 manantiales, uno es para uso público urbano y el otro para uso agrícola.

El volumen de extracción asciende a **8.4 hm³ anuales**, de los cuales 7.1 hm³ (85 %) se destinan al uso agrícola, 0.7 hm³ (8 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y el restante 0.6 hm³ (7 %) se dedica al suministro de los usos industrial, pecuario y doméstico.

A través de los **2 manantiales** identificados, se descarga un caudal pequeño de 1.2 lps, que equivalen a **0.04 hm³ anuales**, que para fines del balance de aguas subterráneas se considera despreciable.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2010-2017, en una superficie de **685 km²**, que corresponde a la zona 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 la conservación de masa es la siguiente:

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

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en los valles y por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (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 utilizados para uso público-urbano y agrícola son pequeños, se considera para fines del balance de agua subterránea 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.

$$\mathbf{Rv + Eh - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S)} \quad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Rv = Recarga vertical

Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal

B = Bombeo

Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR = Evapotranspiración

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

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

$$\mathbf{Rv = B + Sh + ETR + \Delta V(S) - Eh} \quad \mathbf{(2)}$$

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 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 la llanura 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 2017 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

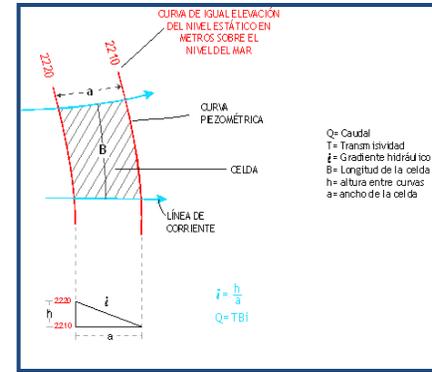
Donde:

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 **7.2 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2017)

| 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 | 2250 | 1400 | 20 | 0.0143 | 0.0004 | 0.0129 | 0.4 |
| E2 | 4750 | 1200 | 20 | 0.0167 | 0.0002 | 0.0158 | 0.5 |
| E3 | 4150 | 2100 | 30 | 0.0143 | 0.0005 | 0.0296 | 0.9 |
| E4 | 8050 | 2350 | 30 | 0.0128 | 0.0002 | 0.0206 | 0.6 |
| E5 | 5200 | 2400 | 30 | 0.0125 | 0.0004 | 0.0260 | 0.8 |
| E6 | 5450 | 2700 | 30 | 0.0111 | 0.0003 | 0.0182 | 0.6 |
| E7 | 6300 | 1530 | 40 | 0.0261 | 0.0005 | 0.0824 | 2.6 |
| E8 | 3600 | 2250 | 30 | 0.0133 | 0.0002 | 0.0096 | 0.3 |
| E9 | 3550 | 2850 | 40 | 0.0140 | 0.0003 | 0.0149 | 0.5 |
| TOTAL | | | | | | | 7.2 |

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 colindantes, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado de las distintas zonas.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros.

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 **8.4 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 2017, 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 **1.9 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2017)

| 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 | 3350 | 3150 | 20 | 0.0063 | 0.0005 | 0.0106 | 0.3 |
| S2 | 8100 | 2200 | 10 | 0.0045 | 0.0010 | 0.0368 | 1.2 |
| S3 | 2500 | 1100 | 10 | 0.0091 | 0.0005 | 0.0114 | 0.4 |
| TOTAL | | | | | | | 1.9 |

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 la Evapotranspiración Real).

El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

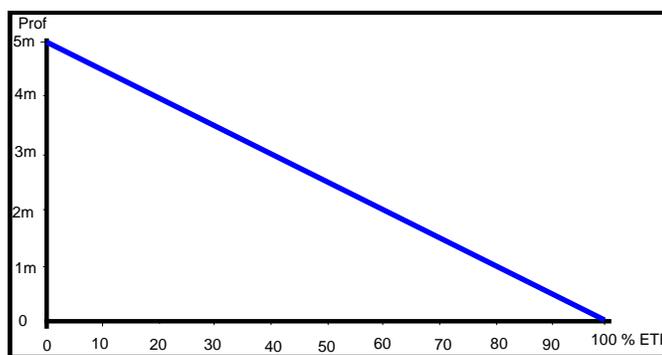
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 16.3 °C y 394.9 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de **379.5 mm anuales**, como se muestra a continuación:

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

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

| | | | |
|----------|-----------|------------------|------------|
| T (°C) = | 16.3 | | |
| P(mm) = | 394.9 | P ² = | 155946.01 |
| L = | 924.03735 | L ² = | 853845.024 |
| ETR (mm) | 379.5 | | |

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 = 4.3 hm³ anuales.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2017)

| RANGOS DE PROFUNDIDAD (m) | PROFUNDIDAD MEDIA (m) | ÁREA (km ²) | LÁMINA ETR (m) | % ETR | VOLUMEN ETR (hm ³ /año) |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|--------------|------------------------------------|
| 2 | 2 | 5.7 | 0.3795 | 0.6 | 1.3 |
| 2 a 5 | 3.5 | 10.5 | 0.3795 | 0.3 | 1.2 |
| 2 a 4 | 3 | 12.1 | 0.3795 | 0.4 | 1.8 |
| | Total | 28.3 | | Total | 4.3 |

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 2010-2017 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.07, 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 detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -2.0 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-0.3 hm³ anuales**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2010-2017)

| Evolución (m) | Evolución media (m) | Área (km ²) | S_y | $\Delta V(S)$ (hm ³ /año) |
|---------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------------------------------|
| 4 | 4 | 2.2 | 0.07 | 0.6 |
| 2 a 4 | 3 | 40.9 | 0.07 | 8.6 |
| 0 a 2 | 1 | 52.4 | 0.07 | 3.7 |
| -2 | -2 | 17.9 | 0.07 | -2.5 |
| -0.5 | -0.5 | 8.0 | 0.07 | -0.3 |
| -1.0 a 0 | -0.5 | 158.8 | 0.07 | -5.6 |
| 0 a -1.0 | -0.5 | 157.2 | 0.07 | -5.5 |
| -4 | -4 | 3.4 | 0.07 | -1.0 |
| | TOTAL | 440.8 | TOTAL | -2.0 |
| | Promedio anual | | | -0.3 |

Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned}R_v &= B + Sh + ETR + \Delta V(S) - Eh \\R_v &= 8.4 + 1.9 + 4.3 - 0.3 - 7.2 \\R_v &= 7.1\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}R &= R_v + Eh \\R &= 7.1 + 7.2 \\R &= 14.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **14.3 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 la descarga natural comprometida es **1.9 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas por flujo subterráneo hacia los acuíferos vecinos Salinas de Hidalgo, Santo Domingo y Villa de Arista, del estado de San Luis Potosí. Por lo tanto, **DNC = 1.9 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **9'319,967 m³ anuales**, 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{MA} &= 14.3 - 1.9 - 9.319967 \\ \text{DMA} &= 3.080033 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **3'080,033 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Espíritu Santo, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en los acuíferos de Guadalupe de las Corrientes, Puerto Madero, Villa Hidalgo, Pinos y Espíritu Santo. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2017. Piezometría e hidrometría del acuífero Espíritu Santo, Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la región de Pinos, en el estado de Zacatecas. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera F14-4 "San Luis Potosí". Escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera F14-A72 "Pinos". Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico-Minera F14-A62 "Espíritu Santo". Escala 1:50,000.