



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL
DE AGUA EN EL ACUÍFERO VILLA GARCÍA (3213), 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.....	11
4.2 Geología estructural.....	16
4.3 Geología del subsuelo	18
5. HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1 Tipo de acuífero	19
5.2 Parámetros hidráulicos	19
5.3 Piezometría	20
5.4 Comportamiento Hidráulico	20
5.4.1 Profundidad al nivel estático	20
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3 Evolución del nivel estático actualizar.....	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.....	28
7.2.1 Bombeo (B)	28
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	28
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	28
7.2.4 Descarga de manantiales (Dm).....	30
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	30
8. DISPONIBILIDAD	31
8.1 Recarga total media anual (R)	32
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 (DAS)	33
9. BIBLIOGRAFIA	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 Villa García, definido con la clave 3213 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el extremo sur oriental del estado de Zacatecas, en el límite con los estados de Aguascalientes y Jalisco, entre los paralelos 22°00'25" y 22°13'12" de latitud norte y entre los meridianos 101°45'06" y 102°02'44" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 305 km².

Limita al norte con el acuífero Villa Hidalgo; al noroeste con Loreto; al este con Pinos, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al sureste con los acuíferos Ojuelos

y Primo Verdad, del estado de Jalisco, y al sur y oeste con Valle de Chicalote, del estado de Aguascalientes (figura 1).

Geopolíticamente, casi la totalidad de la superficie que comprende el acuífero se ubica en el acuífero Villa García, solo pequeñas porciones de sus extremos norte y este pertenecen a los municipios Loreto y Pinos, respectivamente.

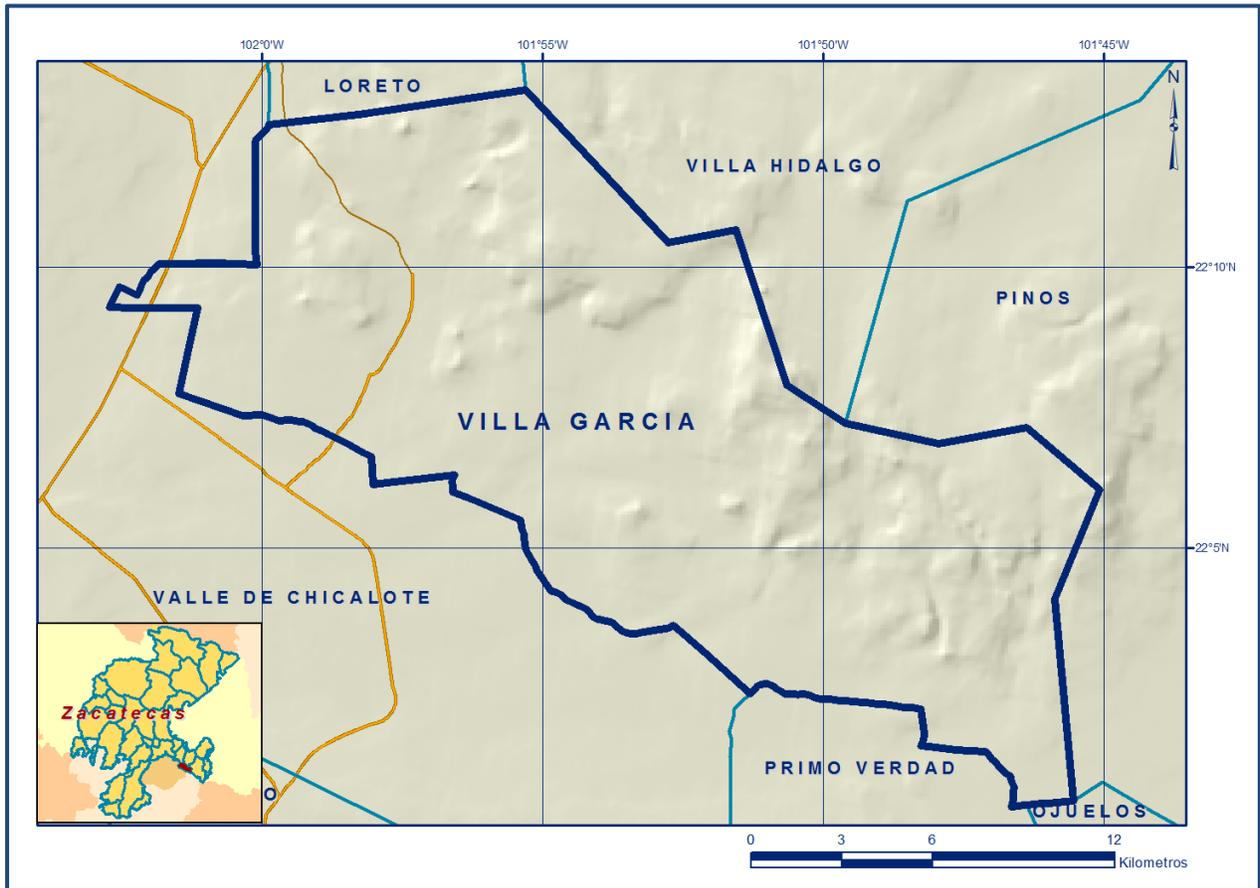


Figura 1. Localización del acuífero

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 3213 VILLA GARCIA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	46	22.5	22	0	25.9	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	101	51	18.4	22	2	24.6	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	101	59	52.6	22	12	32.7	
4	101	58	16.7	22	12	43.2	
5	101	55	17.9	22	13	9.9	
6	101	52	45.6	22	10	26.8	
7	101	51	33.9	22	10	39.9	
8	101	50	39.5	22	7	54.6	
9	101	49	36.4	22	7	13.3	
10	101	47	57.1	22	6	52.1	
11	101	46	22.9	22	7	8.9	
12	101	45	5.2	22	6	2.7	
13	101	45	52.5	22	4	6.3	
14	101	45	33.3	22	0	30.4	DEL 14 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	101	46	22.5	22	0	25.9	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Pinos pertenece al Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico, al Consejo de Cuenca “Río Santiago”, instalado el 14 de julio del 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local 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 los Municipios de Noria de Ángeles, Pinos, Villa García y otros 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 2. 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 e evaluación; a continuación, se citan los más importantes:

PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA REGIÓN DE VILLA GARCÍA, ESTADO DE ZACATECAS, elaborado en 1981 por Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Suobjetivo fue definir el comportamiento del sistema acuífero, las estructuras y las unidades hidrogeológicas con posibilidades de almacenar agua

subterránea, así como la identificación de áreas favorables para la perforación de pozos exploratorios. Entre las actividades de campo más relevantes destacan el censo de aprovechamientos, piezometría análisis físico-químicos e hidrometría de las extracciones.

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 Hidráulicos, 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.

PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y PERFORACIÓN EXPLORATORIA EN LA REGIÓN DE PINOS, VILLA GARCÍA Y GUADALUPE BAÑUELOS DEL ESTADO DE ZACATECAS, elaborado en 1988 por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El objetivo de este estudio fue definir las estructuras y las unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea y conocer el comportamiento del acuífero. Se realizó el censo de aprovechamientos de agua subterránea y se definieron las estructuras y unidades geohidrológicas presentes en el subsuelo mediante la perforación de 5 pozos exploratorios.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DE AGUA, EN LOS ACUÍFEROS DEVILLA GARCÍA, EL SALVADOR, GUADALUPE GARZARÓN, CAMACHO Y EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS Y EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS GARCÍA DE LA CADENA, PINO SUÁREZ Y CORRALES, ZACATECAS. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2007. Su objetivo fue 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.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO VILLA GARCÍA, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. 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, 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. 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 el rasgo fisiográfico que predomina es un llano de piso rocoso, donde se acumularon depósitos aluviales, lacustres y tobas de granulometría variable, este llano se encuentra delimitado en su porción occidental por mesetas extensas; en la parte norte y oriental se observan estas mismas mesetas, presentándose también sierras altas con mesetas, bordeadas por lomeríos muy suaves y aislados con bajadas, formados por una alternancia de areniscas y lutitas. Las mesetas están constituidas por coladas de riolitas, ignimbritas y tobas arenosas.

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 templadoBS₁kw, 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), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), 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 7 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Nigromante, Villa García, Loreto, Los Campos, Las Fraguas, Rancho Seco y Villa Juárez. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1951-2010 y el más corto 1984-2017, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de **437.6 mm, 16.7 °C y 1922.2 mm**, respectivamente.

La mayor precipitación media anual se registra en las sierras del noroeste y del sureste con valores que varían de 480 a 510 mm, presentando variaciones importantes a lo largo del año; los meses más lluviosos son de julio a septiembre y los menos lluviosos de noviembre a abril. La temperatura media anual más alta se registra en la porción sur del acuífero, mientras que la más baja ocurre en toda la región norte. La región presenta heladas en un rango de 20 a 40 días por año.

3.3 Hidrografía

El área se ubica dentro de la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica “Alto Santiago”, cuenca de “Río Verde - Grande”, subcuenca Villa García.

Debido al escaso régimen de precipitación que se registra en esta zona, existen pocos arroyos, de tipo intermitente, que pierden sus escurrimientos hacia la región central de los valles, en donde el material aluvial alcanza los máximos espesores.

El colector principal en la zona que comprende el acuífero es el Arroyo Hondo, el cual capta escurrimientos desde las estribaciones de la sierra que divide a esta región hidrológica. Tiene una dirección general de flujo al poniente, hacia el Estado de Aguascalientes. Posteriormente, fuera de la zona, prosigue por el estado de Aguascalientes y descarga sus aguas en el Río Chicalote, afluente del Río Aguascalientes, mismo que cambia su nombre, ya en el estado de Jalisco, a Río Verde. Con este nombre fluye cerca de Guadalajara, antes de descargar en el Río Juchipila, que se considera uno de los principales afluentes del Río Santiago, el cual finalmente descarga sus aguas en el Océano Pacífico.

Dentro del área no se cuenta con estaciones hidrométricas, ya que los volúmenes que circulan son de un régimen transitorio. No existe infraestructura hidráulica para el almacenamiento del agua dentro del área.

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 fueron rellenadas por material clástico en los diferentes intervalos comprendidos desde el Terciario al Reciente. Estas cuencas están 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. El paisaje del relieve se caracteriza por la presencia de los siguientes sistemas de tofoformas:

Mesetas. Se encuentran ubicadas principalmente en la porción central del área, presentan alturas que varían entre 2550 y 2350 msnm. Están formadas por derrames riolíticos con escarpes de 20 a 30 m de altura, en ellas se desarrolla un drenaje dendrítico rectangular.

Montañas Plegadas. Ocupan la porción central del área, formando una serie de cerros redondeados con alturas que varían de 2200 a 2300 msnm, que presentan drenaje dendrítico paralelo.

Planicies. Se ubican tanto en la porción central como en la oriental y occidental del área, presentan alturas de 2050 a 2200 msnm, con drenaje dendrítico espaciado.

De acuerdo a lo anterior, se puede considerar que el área de estudio 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 Terciario 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 Terciario 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).

La secuencia volcánica del área está construida por rocas de composición félsica que cubren a todas las rocas preexistentes, emplazadas por medio de varias etapas y/o pulsaciones de carácter principalmente explosivo, diferenciables en la zona por criterios texturales, forma de emplazamiento, posible origen y características geoquímicas, que permiten identificar unidades de riolitas-ignimbritas e ignimbritas-riolitas. El último evento volcánico registrado en la zona está representado por depósitos de caída libre (tobas riolíticas), intercalados con niveles de areniscas, débilmente consolidados y distribuidos localmente. A finales del Terciario y principio del Cuaternario se infiere el desarrollo de abanicos aluviales, representados por depósitos de arenas, limos y conglomerados polimícticos; que cubren generalmente las partes topográficamente más bajas, en lo que corresponde regionalmente a una fracción del graben de Aguascalientes y más localmente al graben de Loreto, en contacto discordante a las unidades sedimentarias del Cretácico y a las rocas volcánicas del Terciario. Por su posición estratigráfica y similitud litológica en zonas aledañas, se les asignó una edad Plioceno-Pleistoceno. Constituyendo grandes acumulaciones de material fluvial, producto de la intensa erosión de las formaciones cretácicas y volcánicas terciarias, se presenta la unidad aluvial rellenando los valles de

la porción occidental, cuyo espesor en algunos sitios alcanza 20 m. Por sus relaciones estratigráficas observadas en campo se le ha asignado una edad Pleistoceno-Holoceno. También del Cuaternario (Holoceno), se depositaron materiales arcillo-arenosos, gravas y boleas, principalmente a lo largo de los arroyos (Carta Geológico-Minera Villa García F14-A81. Escala 1:50,000. SGM, 2008) (figura 2).

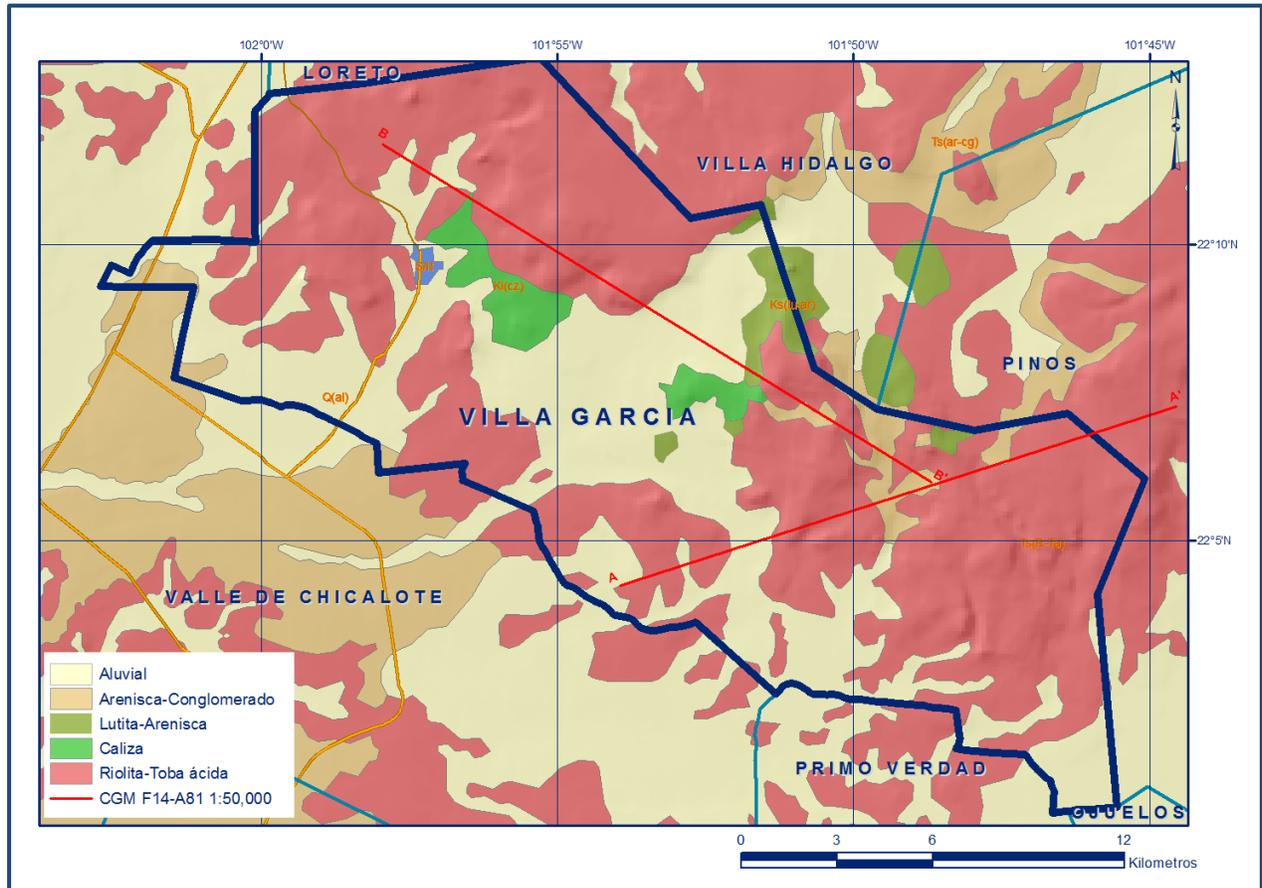


Figura 2. Geología general del acuífero

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. Aunque no aflora toda la secuencia, se describe la columna litológica regional.

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, metamorizadas 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.

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.

Jurásico

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 la porción norte del acuífero, en las cercanías de la localidad de Pinos. 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 calcáreo-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

Terciario Volcánico Riolítico

El paquete de rocas volcánicas que fueron eyectadas durante el Terciario 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 terciarias.

Ignimbritas

Esta unidad está ampliamente distribuida en la región ocupando diferentes niveles estratigráficos dentro de la secuencia volcánica terciaria. 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.

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 norte y este del acuífero, al sur de la localidad San Pablo. 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 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 20 a 40 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 Terciario 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).

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 Terciario 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).

Mediante la interpretación de imágenes de satélite y trabajos de campo, se definieron dos sistemas de fallamiento con orientaciones NE-SW y NW-SE. El sistema de orientación NE-SW consiste en una serie de fallas normales, en ocasiones escalonadas, que se ubican principalmente en la porción meridional. Ambos sistemas forman pilares y fosas tectónicas de menos magnitud. Regionalmente destaca el graben de Loreto, ubicado a pocos kilómetros al poniente, que se puede relacionar con el sistema del graben de Aguascalientes (Carta Geológico-Minera Villa García F14-A81. Escala 1:50,000. SGM, 2008).

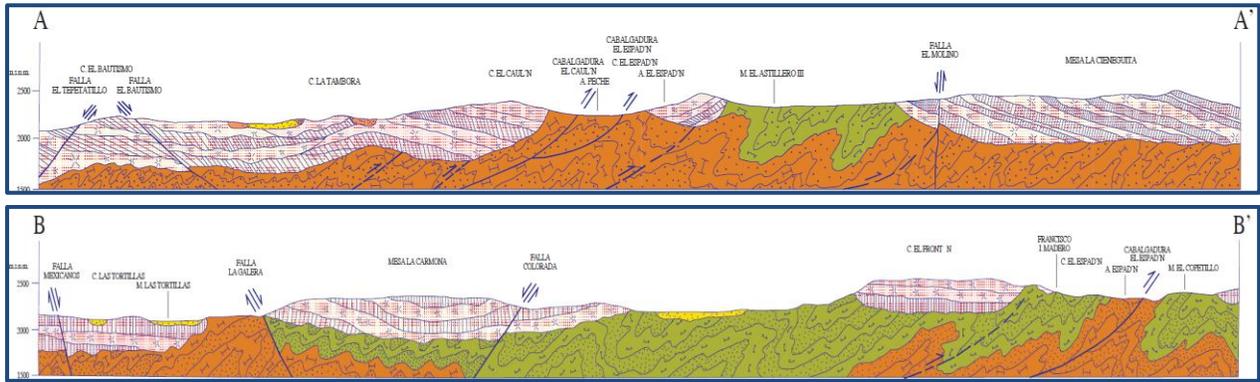
La geología estructural comprende en primera fase los plegamientos del basamento marino y en segunda fase los movimientos tectónicos que produjeron el vulcanismo continental del Paleógeno. La primera fase ocurrió a principios del Paleógeno, cuando los sedimentos marinos del cretácico sufrieron deslizamientos submarinos dirigidos al NE. Estos movimientos orogénicos crearon extensos anticlinorios y sinclinorios. En el anticlinorio formado en la sierra localizada al este del acuífero se reconocen dos anticlinales, infiriéndose un tercero ubicado al este de ellos, 2 km al SE de Francisco I. Madero. En la segunda fase las riolitas de Villa García, así como aquellas que afloran en las localidades El Peñón y Los Rincones, ubicadas al SW y SE, respectivamente, son anteriores a las riolitas del Complejo Picacho, ya que éstas últimas se sobreponen a las

primeras. El origen tectónico de este vulcanismo no pudo definirse por la presencia directa de fallas en campo; no obstante, la distribución de domos volcánicos parece indicar dos direcciones preponderantes de fracturamiento, una dirigida al NE y otra en sentido contrario, al SE. Los frentes abruptos que marcan el límite de las mesetas riolíticas del Gran Valle siguen una dirección al NE. En el lado opuesto y también con dirección al NE, se identifica un lineamiento que limita la extensión del borde oriental de la gran caldera central de Rancho Nuevo. Este rasgo morfológico de primer orden, representa muy probablemente un fenómeno de colapso de un antiguo gran volcán que fue precisamente el centro de emisión del complejo riolítico del Picacho.

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, la interpretación de la información hidrogeológica que existe y la correlación con acuíferos vecinos, 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 depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada y los conglomerados polimícticos que constituyen los depósitos de talud y rellenan el valle tectónico. El medio fracturado se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica del Paleógeno-Neógeno, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias cretácicas (calizas, lutitas y areniscas) 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 por lutitas y limolitas.

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 están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera Villa García F14-A81 Esc. 1:50,000 (SGM, 2008)
Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada y conglomerados polimícticos, de espesor hasta de algunas decenas de metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El espesor conjunto promedio de ambas unidades es del orden de 200 m. 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.

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

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2007, se ejecutaron 3 pruebas de bombeo. Adicionalmente se analizó la información de 4 pruebas más realizadas en estudios previos (SARH, 1981, en el acuífero vecino Pinos que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica; todas las pruebas fueron de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos varían de 1.4×10^{-5} a 3.3×10^{-3} m²/s. Si consideramos un espesor saturado promedio de 100 m, los valores de conductividad hidráulica varían de 1.4×10^{-6} a $3.3 \times$

10^{-5} m/s (0.12 a 2.85 m/d).

Adicionalmente, se cuenta con información de 22 afloros 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 (lps/m) \approx T ($\times 10^{-3}$ m²/s). Los valores obtenidos varían de **0.01 a 2.5 lps/m**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, 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 2007-2017, que es el 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 2017 muestra que los valores varían, de manera general, de 3 a 50 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. Los valores más someros, menores de 5 m, se registran en los subálveos de ríos y arroyos, en toda la superficie de la zona de explotación; en tanto que los más profundos, mayores de 20 m, se presenta en la porción centro-sur y suroriental del acuífero, hacia las localidades El Tepetatillo y Montesa, respectivamente, y al norte y este de Villa García (figura 4)

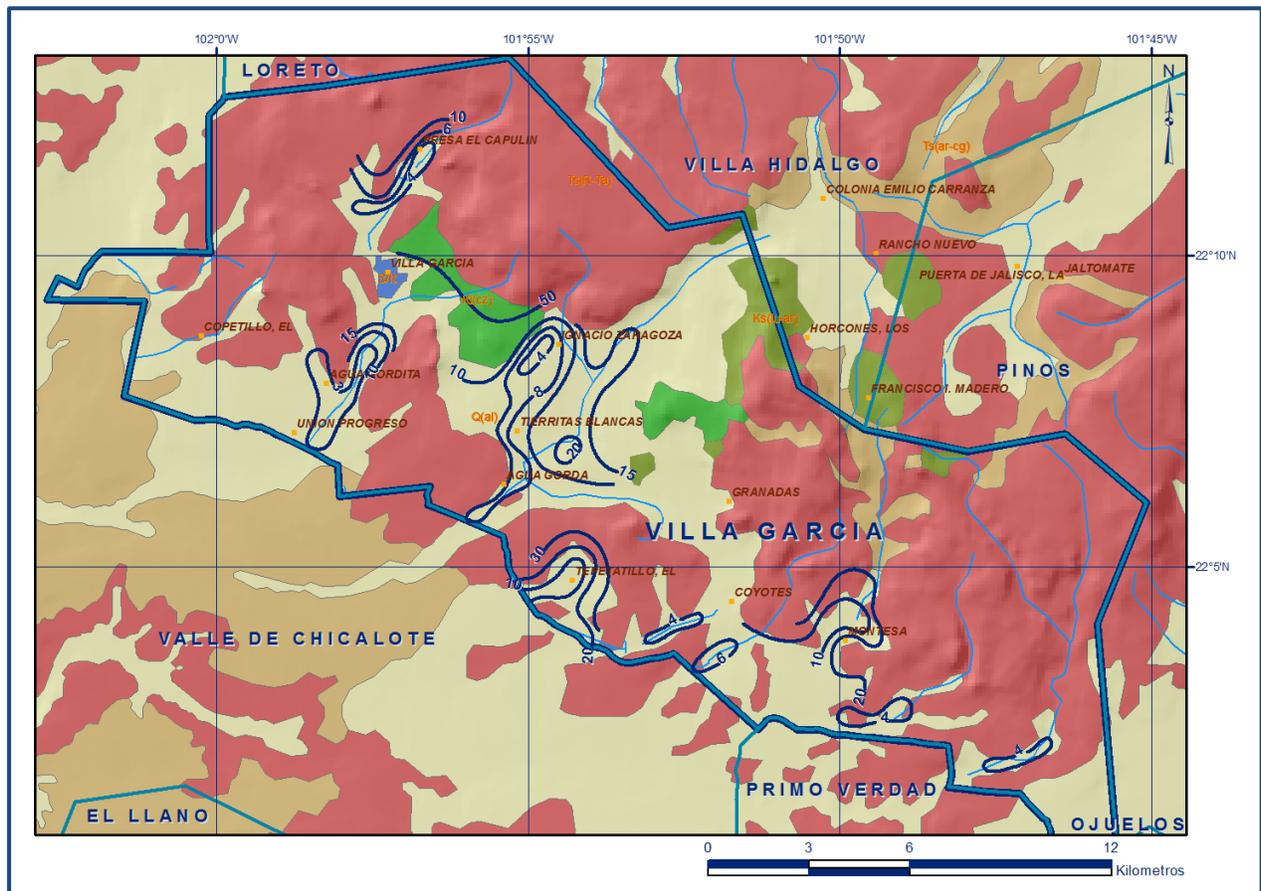


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2017)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2017 registró valores que varían de 2180 a 2040 msnm. Las menores elevaciones de 2040 a 2110 msnm se registran en la porción sur, suroriental y suroccidental del acuífero, en el límite con el acuífero vecino Valle de Chicalote, del estado de Aguascalientes. Los valores máximos, de 2050 a 2180 msnm, se presentan en las regiones altas de los valles, hacia los poblados Presa El Capulín, Ignacio Zaragoza y Montesa; desde donde descienden gradualmente hacia el límite con el acuífero vecino Valle de Chicalote, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo N-S y NE-SW, paralela a la dirección de escurrimiento superficial (figura 5).

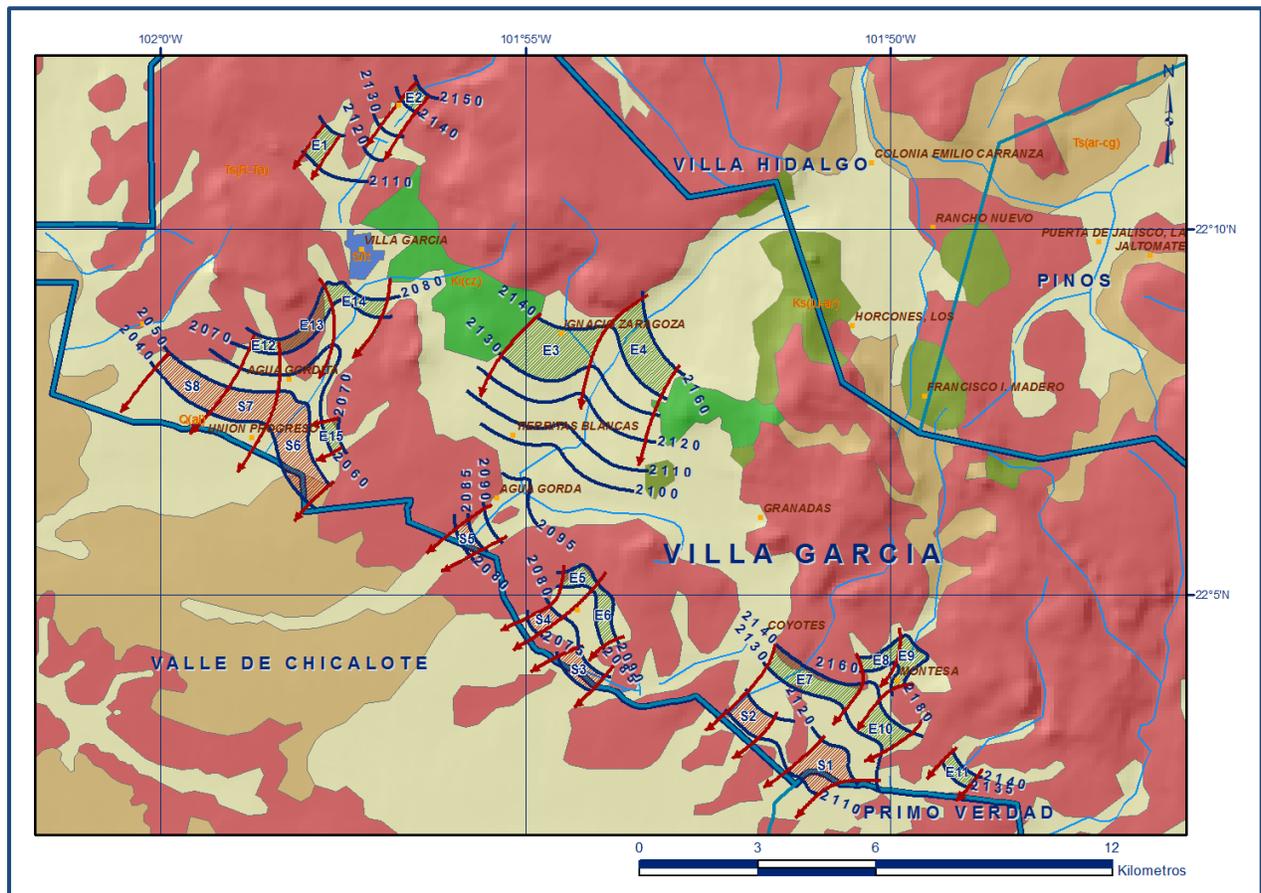


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2017)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático en el periodo 2007-2017 registra valores de abatimiento y recuperación poco significativos y locales. Los abatimientos varían de 1 a 3 m, es decir 0.1 a 0.3 m anuales, con valores muy puntuales de 6 m (0.6 m anuales), y se registran entre los poblados Villa García y Presa El Capulín, Tierritas Blancas e Ignacio Zaragoza, en las inmediaciones de El Tepetatillo, Coyotes y al sur de Montesa. Las recuperaciones medidas varían de 1 a 2 m, que representan 0.1 a 0.2 m anuales, y se registraron entre las localidades Agua Gordita y Unión Progreso (figura 6).

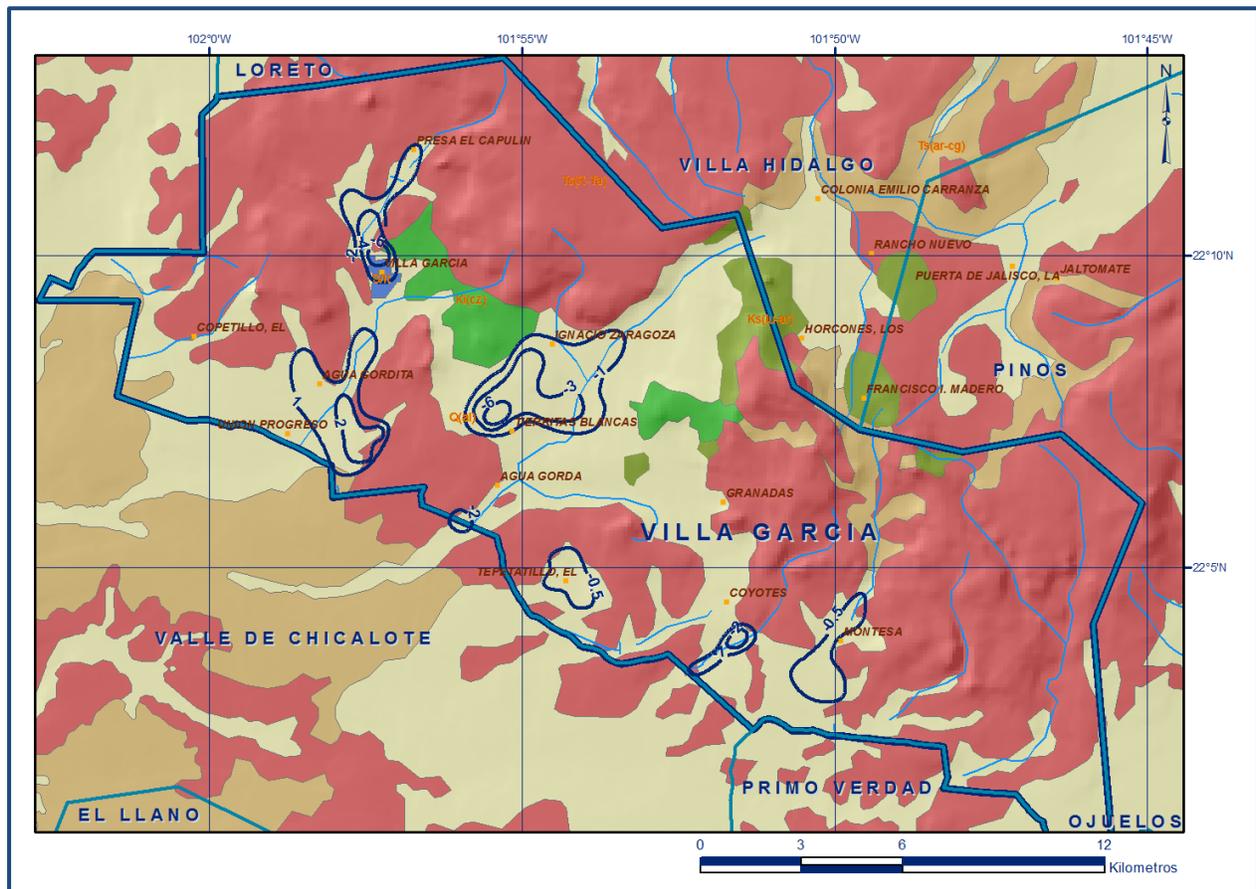


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2017)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2007, se seleccionaron 20 muestras de agua subterránea para 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, nitratos y flúor.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD varían de 55 a 493 mg/l, que no superaron el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD, para el agua destinada al consumo humano. 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 109 a 986 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción sur. En

la mayor parte del acuífero se presentan valores de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos relativamente bajos, debido a que los niveles estáticos son someros.

Los valores de temperatura varían de 21 a 29 °C y el pH varía de 7.9 a 9.7, por lo que se concluye que el agua se considera ligeramente alcalina. En 5 muestras se detectaron concentraciones de flúor que exceden los 1.5 mg/l que establece dicha norma como límite máximo permisible.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las familias de agua que predominan son la bicarbonatada-sódica-potásica(10 muestras) y bicarbonatada-sódica-cálcica(10 muestras), que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánicas ácidas y rocas sedimentarias calcáreas.

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 (14) se clasifican como C_2S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, 2 muestras como C_1S_1 , que representa agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable; ambas se consideran aptas para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos. Las 4 muestras restantes se clasificaron como C_3S_1 que corresponde a salinidad alta con bajo contenido de sodio intercambiable, cuya utilización en la agricultura requiere de suelos con buen drenaje y lavados periódicos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos llevado a cabo en el año 2007 y complementada con información 2017 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), se tienen registradas un total de 578 obras que aprovechan el agua subterránea, 72 son pozos, 502 norias y 4 manantiales; de las cuales 532 están activas y 42 se consideran inactivas. De las obras activas, 363 se destinan al uso agrícola, 113 tienen un uso múltiple, 30 son para uso público-urbano, 16 son pecuario, y 10 más para uso doméstico. Se incluye en el censo la existencia de 4 manantiales en los que predomina el uso agrícola.

El volumen de extracción asciende a **8.6 hm³** anuales, de los cuales 6.5 hm³ (75.6 %) son para uso agrícola, y 2.1 hm³ (24.4 %) se destinan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región. El volumen para uso doméstico es muy

pequeño.

Adicionalmente, a través de los **4 manantiales** identificados, se descarga un caudal conjunto estimado de 3.5 lps, que equivalen a **0.1 hm³ anuales**, destinados al uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2007-2017, en una superficie de 102.6 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:

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

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 el acuífero (R_t) 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 (R_v), y por flujo subterráneo horizontal (E_h).

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 (R_i). Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano y agrícola son incipientes, para fines del balance de agua subterránea se considera 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.

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR: Evapotranspiración

Dm: Descarga a través de manantiales

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

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

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

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:

$$Q = T * B * i$$

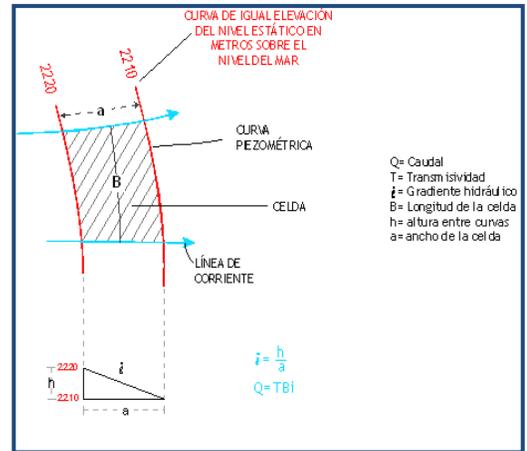
Donde:

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 **6.3 hm³/año**.

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	470	880	10	0.0114	0.0004	0.002	0.1
E2	450	540	10	0.0185	0.0008	0.007	0.2
E3	1800	1400	10	0.0071	0.0008	0.010	0.3
E4	2100	900	20	0.0222	0.0010	0.047	1.5
E5	880	540	5	0.0093	0.0003	0.002	0.1
E6	1500	600	5	0.0083	0.0003	0.004	0.1
E7	2250	600	10	0.0167	0.0005	0.019	0.6
E8	1050	400	20	0.0500	0.0003	0.016	0.5
E9	1200	750	20	0.0267	0.0008	0.026	0.8
E10	1050	650	10	0.0154	0.0005	0.008	0.3
E11	950	380	5	0.0132	0.0008	0.010	0.3
E12	700	380	10	0.0263	0.0004	0.007	0.2
E13	1800	350	10	0.0286	0.0003	0.015	0.5
E14	1480	370	10	0.0270	0.0005	0.020	0.6
E15	800	320	10	0.0313	0.0003	0.008	0.2
TOTAL						6.3	

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 y otros acuíferos vecinos, 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), por evapotranspiración (ETR) de niveles freáticos someros 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 **10.3 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 **2.4 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	1080	1300	10	0.0077	0.0004	0.003	0.1
S2	1000	640	10	0.0156	0.0005	0.008	0.2
S3	1100	540	5	0.0093	0.0008	0.008	0.3
S4	460	680	5	0.0074	0.0005	0.002	0.1
S5	800	360	5	0.0139	0.0010	0.011	0.4
S6	2600	1000	10	0.0100	0.0008	0.021	0.7
S7	1280	880	10	0.0114	0.0005	0.007	0.2
S8	1700	720	10	0.0139	0.0005	0.012	0.4
TOTAL							2.4

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

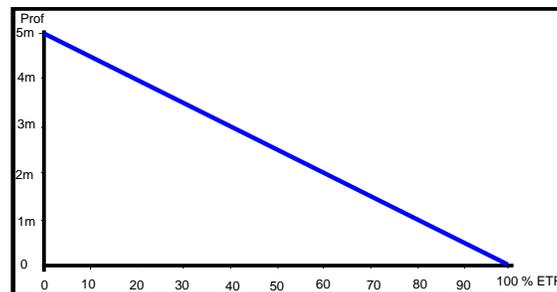
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que 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, 16.7 °C y 437.6 mm, respectivamente, obteniéndose una lámina de evapotranspiración de 415.0 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) =	16.7		
P(mm) =	437.6	P ² =	191493.76
L =	950.37315	L ² =	903209.124
ETR (mm)	415.0		

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 =0.7 hm³/año.**

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)
3	3	2.4	0.4150	0.4	0.4
4	4	3.4	0.4150	0.2	0.3
	Total	5.8		Total	0.7

7.2.4 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 4 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 3.5 lps, que representan un volumen anual de **0.1 hm³**.

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 2007-2017 (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 volumen del cambio de almacenamiento en el intervalo 2007–2017, fue de -2.3 hm³, que representa un promedio anual de **-0.2 hm³** (tabla 5).

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2007-2017)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-0.5	-0.5	4.2	0.07	-0.1
-2	-2	2.1	0.07	-0.3
-2 a -1	-1.5	0.8	0.07	-0.1
-3 a -1	-2	5.7	0.07	-0.8
-6	-6	0.6	0.07	-0.3
-6 a -3	-4.5	3.1	0.07	-1.0
-6 a -4	-5	1.2	0.07	-0.4
2	2	1.3	0.07	0.2
2 a 1	1.5	4.7	0.07	0.5
	TOTAL	23.7	TOTAL	-2.3
	Promedio anual			-0.2

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:

$$R_v = B + Sh + ETR + Dm + \Delta V(S) - E_h$$

$$R_v = 8.6 + 2.4 + 0.7 + 0.1 - 0.2 - 6.3$$

$$R_v = 5.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 5.3 + 6.3$$

$$R = 11.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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 incidental. Para este caso su valor es **11.6 hm³/año**, 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 **2.5 hm³ anuales**, de los cuales 2.4 corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero Valle de Chicalote, del estado de Aguascalientes y 0.1 a la descarga de manantiales. **DNC = 2.5 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 **9'824,947 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 11.6 - 2.5 - 9.824947 \\ \text{DMA} &= - 0.724947 \text{ hm}^3. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario existe un déficit de **724,947 m³**.

9. BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en los acuíferos Villa García, El Salvador, Guadalupe Garzarón, Camacho y El Cardito, estado de Zacatecas y Evaluación Geohidrológica de los Acuíferos García de la Cadena, Pino Suárez y Corrales, Zac. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Villa García, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Piezometría e hidrometría del acuífero Villa García, Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la región de Villa García, estado de Zacatecas. Elaborado por Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S. A.

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.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1988. Prospección Geohidrológica y Perforación Exploratoria en la Región de Pinos, Villa García y Guadalupe Bañuelos del Estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua. Unidad de Aguas Subterráneas.

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, 2008. Carta Geológico-Minera Villa García F14-A81. Escala 1:50,000.