

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA BLANCA (3228) ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	9
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía.....	12
4.2	Geología estructural	19
4.3	Geología del subsuelo	21
5	HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1	Tipo de acuífero	21
5.2	Parámetros hidráulicos.....	22
5.3	Piezometría	22
5.4	Comportamiento hidráulico.....	23
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	23
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3	Evolución del nivel estático	24
5.5	Hidroggeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	26
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
7.1	Entradas	27
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	28
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	28
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	29
7.2	Salidas.....	30
7.2.1	Bombeo (B).....	30
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

El acuífero La Blanca, definido con la clave 3228 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°27' y 22° 49' de latitud norte y entre los meridianos 101°54' y 102° 11' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 568 km².

Limita al norte con el acuífero El Barril, del estado de San Luis Potosí; al este con los acuíferos Villa Hidalgo y Loreto; al sur con Loreto y Ojocaliente; al oeste con Ojocaliente

y al noroeste con Chupaderos; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas. Geopolíticamente el área que cubre el acuífero comprende la mayor parte del municipio Pánfilo Natera y porciones menores de municipios de Ojocaliente y Villa González Ortega (figura 1).

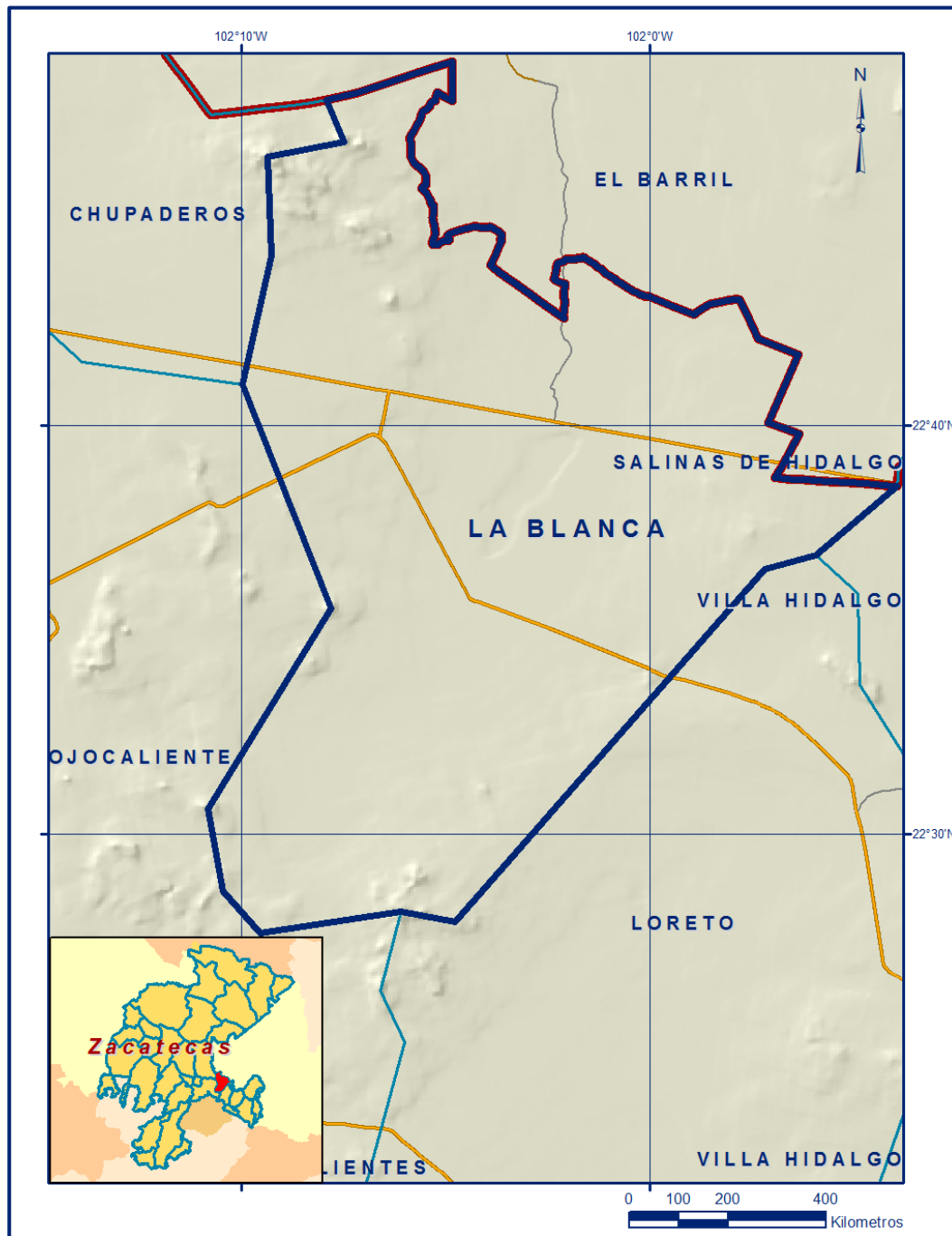


Figura 1. Localización del Acuífero

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

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

ACUIFERO 3228 LA BLANCA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	53	55.9	22	38	30.9	
2	101	55	56.0	22	36	49.3	
3	101	57	10.3	22	36	29.4	
4	102	4	46.1	22	27	51.4	
5	102	6	5.7	22	28	6.2	
6	102	9	33.3	22	27	34.7	
7	102	10	27.0	22	28	35.9	
8	102	10	49.2	22	30	36.3	
9	102	7	48.8	22	35	31.0	
10	102	9	58.4	22	41	12	
11	102	9	15.5	22	44	10.0	
12	102	9	21.2	22	46	34.6	
13	102	7	29.6	22	46	57.5	
14	102	7	55.5	22	47	58.1	DEL 14 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	101	53	55.9	22	38	30.9	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa VII “Cuencas Centrales del Norte”, al Consejo de Cuenca Altiplano, instalado el 23 de noviembre de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas.

El extremo suroriental se ubica en la Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico. Su territorio está totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda; el primero rige en casi la totalidad de su superficie y es el “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. En los extremos suroccidental y noroccidental del acuífero rige el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del Estado de Zacatecas, que comprende la cuenca media del río Aguanaval y otros”, publicado en el DOF el 16 de mayo de 1960. Esta veda se clasifica

como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza 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 evaluación; algunos de cobertura regional, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR EN LA ZONA DE LA BLANCA, EN EL ESTADO DE ZACATECAS, Realizado por Consultores, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), en el año 1974. Su objetivo fue conocer en forma preliminar el potencial del acuífero y sus condiciones de funcionamiento hidráulico. Entre sus actividades más importantes destacan los reconocimientos hidrogeológicos, censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, piezometría, pruebas de bombeo y toma de muestras de agua para análisis físico-químico. El balance de aguas subterráneas concluye que el acuífero se encontraba en condición de subexplotación y establece que era posible incrementar el volumen de extracción.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA “LA BLANCA”, ESTADO DE ZACATECAS, Realizado por Bufete Geológico y Ciencias Afines S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en el año 1983. Este trabajo tuvo como objetivo determinar las condiciones de funcionamiento del acuífero, de su aprovechamiento y de su recarga.

Entre sus actividades más importantes destacan: censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, piezometría, hidrometría, pruebas de bombeo, toma de muestras de agua para análisis físico-químico, reconocimiento hidrogeológico e hidrología superficial.

Concluye que la porción norte del acuífero está en equilibrio mientras que región sur está sobreexplotada, mostrando conos de abatimiento cada vez mayores y una diferencia entre recarga y descarga de 8 hm³/año.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE CALERA-BENITO JUÁREZ, CHUPADEROS, GUADALUPE BAÑUELOS, CUENCA DEL AGUANAVAL, OJOCALIENTE Y LA BLANCA, ZACATECAS. Realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 1997.

Los objetivos del estudio fueron establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica de la zona, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer la evolución y la condición actual de los niveles del agua subterránea, así como su comportamiento inducido por causas naturales o antropogénicas, especialmente por el incremento de la extracción para satisfacer el desarrollo futuro de las actividades productivas.

CENSOS DE APROVECHAMIENTOS DE AGUAS NACIONALES EN LOS ACUÍFEROS BENITO JUÁREZ, VILLANUEVA, OJOCALIENTE, CHUPADEROS, GUADALUPE BAÑUELOS, LA BLANCA, LORETO, VILLA HIDALGO, ABREGO, AGUANAVAL, CALERA, GUADALUPE DE LAS CORRIENTES Y PUERTO MADERO. Realizado por la Universidad Autónoma de Zacatecas, en los años 2010 y 2012, para la Comisión Nacional del Agua.

Los trabajos consistieron en la actualización del inventario de aprovechamientos del agua subterránea de 13 acuíferos del estado de Zacatecas. Durante los recorridos de campo se realizó el geoposicionamiento de las captaciones, y se recabó información relativa a datos generales de los aprovechamientos, características constructivas y de operación.

Se efectuó un análisis comparativo de características y volúmenes autorizados en títulos de concesión con los volúmenes extraídos obtenidos en el censo.

BALANCE REGIONAL EN ACUÍFEROS NO CONFINADOS BASADO EN LA DEFINICIÓN DE SISTEMAS DE FLUJO. Realizado en 2015 por Wenceslao Alvarez Robles, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería.

En esta tesis se presenta una metodología para el cálculo del balance regional en el área que comprende los acuíferos Ojocaliente, Loreto, Villa Hidalgo y La Blanca, del estado de Zacatecas, en el que se incorpora el flujo vertical ascendente proveniente de flujos profundos considerando la teoría de los sistemas de flujo. Fue necesario

monitorear las variaciones de los niveles del agua subterránea, además de obtener las características hidrogeoquímicas, tomando para ello 50 muestras de agua subterránea, algunas de ellas en el acuífero La Blanca. Se realizaron pruebas de bombeo y se evaluó la calidad del agua.

El enfoque regional permitió conocer la continuidad hidráulica entre los acuíferos, al incorporar los sistemas de flujo en balances permite estimar un volumen que generalmente es ignorado al considerar que la profundidad de los pozos es el límite inferior de los acuíferos.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO LA BLANCA, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015. Se utilizó la información piezométrica reciente para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

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 y parte del occidental se localizan en la Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

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 promedio 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 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 mayor superficie del acuífero (80 % de su superficie) prevalece el clima el clima árido, templado (BS₀kw). En el 20% restante el clima es semiseco, templado (BS₁kw).

Es clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipos seco (o) y semiseco (i), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas media anual del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido.

El régimen de lluvia (w), que 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.

Este 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. El clima se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

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 de 20 a 40 días de heladas por año.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Saladillo, Villa González Ortega, Luis Moya y Ojocaliente. Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más largo 1980-2014 y el más corto 2000-2014, y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **402.3 mm, 15.7 °C y 2,395.6 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 37 “El Salado”, en la Cuenca Hidrológica “San Pablo y Otras”. No existen corrientes superficiales perennes, sólo algunos escurrimientos durante la temporada de lluvias que forman arroyos torrenciales que originan en las zonas topográficamente más altas y que se almacenan en las lagunas El Sapo (Santa Elena), El Tule, Las Pilas y El Salado.

Los tipos de drenaje que se observan en el área son dendrítico, paralelo y subparalelo; el primero se presenta en las regiones montañosas y los últimos en los valles y planicies, donde llegan a desaparecer. Existen pocos aprovechamientos de los escurrimientos superficiales, sólo algunas pequeñas presas de reducida capacidad de almacenamiento y un mayor número de bordos y tanques construidos sobre los arroyos principales, utilizados para abrevadero.

3.4 Geomorfología

Los sistemas de topoformas que se presentan en la zona corresponden a un extenso llano de piso rocoso; limitado en su porción sureste por bajadas aluviales, al poniente por lomeríos de pie de monte con mesetas, al sur y noroeste existen pequeñas sierras abruptas y al sureste se presentan pequeñas mesetas.

La región presenta planicies con elevación promedio de 2,050 msnm, constituidas principalmente por materiales de relleno, sobre los que se han formado lagunas de poca profundidad. Por lo general se encuentran alineadas y probablemente representen zonas de debilidad asociadas a fallas o fracturas. Rodeando el valle se presenta una serie de elevaciones que conforman mesetas y cerros que se elevan a 200 m sobre el nivel de la planicie y constituyen el límite topográfico del acuífero.

Las principales elevaciones se encuentran distribuidas en diferentes sitios: en la porción oriental se observan algunas mesetas y restos de antiguos volcanes, que tienen composición riolítica y basáltica; en la porción suroriental se presenta un conjunto de lomeríos y mesetas de composición riolítica.

Hacia la porción noroccidental se encuentran las elevaciones de mayor altura, cuyo núcleo está compuesto de rocas ígneas intrusivas, que afectaron a las rocas calcáreas preexistentes, y que posteriormente fueron cubiertas por materiales riolíticos que son los que forman las crestas de los cerros, como se puede apreciar al noroeste del poblado El Saucito. En el extremo suroccidental del área existen cerros, mesetas y lomeríos que están formados por materiales riolíticos principalmente; en cambio, hacia la porción sur y oriental, en las inmediaciones de los poblados Milagros y Pastoría, existen elevaciones de pendiente suave, formadas por rocas metamórficas y calcáreas marinas, coronadas por rocas intrusivas y volcánicas de composición riolítica.

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), los cuales 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, la unidad más antigua corresponde al Triásico Superior y está conformada por una secuencia de rocas metamórficas y metasedimentarias que presentan metamorfismo de bajo grado en facies de esquistos verdes, que afloran al noreste y suroeste de la ciudad de Zacatecas, conocida como Formación Zacatecas.

Al sureste aflora una secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada en facies de esquistos verdes que aflora en el distrito minero de Tepezalá, donde cabalga a rocas del Cretácico Inferior, cuya edad se asigna al Jurásico Superior y se denomina Formación Cieneguitas (Dávila et al., 1988). Se encuentra en contacto tectónico con el Grupo Fresnillo del Cretácico Inferior (Carta Geológico-Minera Zacatecas F13-6, escala 1:250,000. SGM 1997).

Sobre ella descansa concordantemente la unidad nombrada informalmente como Formación El Varal (Velasco H.M. 1989), conformada por calizas, lutitas con bandas y nódulos de pedernal; ambas unidades afloran de manera aislada en forma de ventanas estructurales, presentan metamorfismo regional de bajo grado y están intrusionadas por un tronco diorítico de edad Cretácico Inferior.

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).

Las rocas intrusivas de composición granítica, granodiorítica y diorítica cortan la secuencia volcánica terciaria. En algunas localidades se observa la presencia de cuerpos intrusivos de tipo pórfido andesítico y dacítico, que afectaron a este paquete volcánico y a los que se les atribuye la mineralización.

Los eventos volcánicos se manifestaron hasta el Plio-Cuaternario. Durante el Pleistoceno-Holoceno se depositaron cenizas riolíticas y lapilli, que presentan estratificación masiva, y arenas finas con estratificación cruzada, con restos de vertebrados. Rellenando las depresiones topográficas, se encuentra material aluvial, constituido principalmente por gravas, arenas y limos (figura 2).

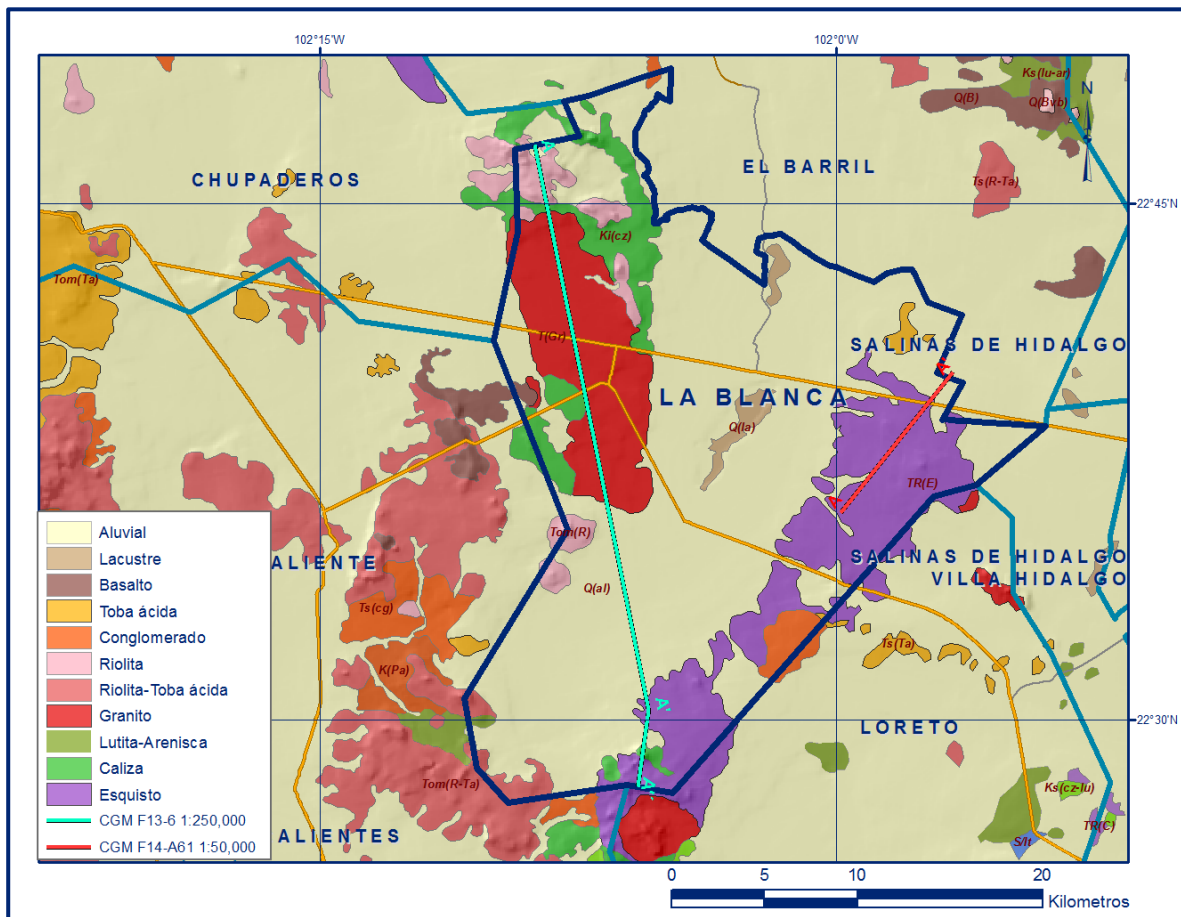


Figura 2. Geología general del acuífero

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.

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.

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, meta-areniscas, metatobas, metaconglomerados y metacalizas, interestratificadas con filitas. Sobre las cuales sobreyacen 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 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 recrystalizadas. En las cuarcitas y filitas se llegan a presentar 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.

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Cieneguitas

Nombre propuesto por Dávila et al., (1988) para la secuencia vulcanosedimentaria constituida por sedimentos psamíticos y calcáreos metamorfoseados de facies de facies de esquistos verdes, con algunos meta-basaltos y filitas (Aranda, 1984); que aflora en el distrito minero de Tepezalá, Aguascalientes, donde se encuentra cabalgando a rocas calcáreo-arcillosas del Cretácico Inferior. Se encuentra también en contacto tectónico con el Grupo Fresnillo del Cretácico Inferior.

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, y 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 y 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 los núcleos anticlinales en forma de estrechas bandas paralelas que limitan a la Formación Zuloaga. 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 metamorfizados.

Se correlaciona con los grupos Fresnillo y Noria de Ángeles (Espinoza, 1991), constituidos 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 ubicadas principalmente en la porción sur del acuífero, 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.

Dentro del área del acuífero aflora principalmente en las sierras plegadas de la porción sur, 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 medio es de 300 m.

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 índice 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. 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 principalmente en la Sierra de Guadalupe. 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 varían en espesor de 5 a 40 cm, 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; 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

Unidad 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. Sus afloramientos se encuentran restringidos a la porción sur del acuífero.

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, 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.

Su textura es frecuentemente porfídica en un matriz afanítica, vítrea en la que están soportados fragmentos de vidrio y cristales de cuarzo y feldespatos, a veces soldados por la misma matriz. Se presentan compactas, resistentes a la erosión, de baja permeabilidad y porosidad, con un importante desarrollo de fracturamiento vertical, en forma de columnas, que origina los típicos escarpes. Su disposición estructural subhorizontal permite definir espesores que varían de 50 a 150 m de potencia.

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.

Rocas Intrusivas

Granodiorita

Conforman un granito monzonítico calcoalcalino, con variaciones a diorita y cuarzomonzonítica, que intrusionan a una unidad vulcanosedimentaria del Jurásico Superior- Cretácico Inferior. Aflora en el extremo sur y noroccidental del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Pastoría y General Pánfilo Natera, respectivamente.

CUATERNARIO

Basaltos

Flujos de lavas basálticas de color negro que al intemperismo muestran un color gris oscuro con tonos pardos, de estructura masiva, que al intemperizarse forman bloques irregulares o en ocasiones esféricos; presentan textura afanítica y estructura vesicular, fracturamiento variable con algunas fracturas rellenas de calcedonia.

Por su posición estratigráfica y por su asociación con los basaltos que afloran en otras localidades de la región, se les asigna una edad correspondiente al Pleistoceno, que representan el último evento magmático reconocido en la región asociado con extravasaciones de material muy profundo a través de zona de debilidad cortical.

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 principalmente al sur y sureste del acuífero; descansa discordantemente sobre rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas. De acuerdo a su posición estratigráfica se le asigna 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 los valles 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 la parte más baja de los valles, cubriendo discordantemente a rocas metasedimentarias, vulcanosedimentarias, así como a tobas y conglomerados del Oligoceno. Su espesor varía de 5 a 10 m y su edad corresponde al Holoceno. Esta unidad incluye también los depósitos lacustres que conforman la zona de las lagunas Santa Elena (o El Sapo), El Tule, Las Pilas y El Salado, constituidas por arcillas y limos con intercalaciones de depósitos evaporíticos.

4.2 Geología estructural

Las rocas metamorizadas presentan estructuración plana bien desarrollada, en ocasiones puede apreciarse una segunda foliación.

La orientación preferencial de la primera foliación es NW-SE con inclinación variable al NE y SW. La geometría indica que la foliación se encuentra plegada y el plegamiento está relacionado a la segunda fase de foliación.

Estas estructuras están también asociadas a las cabalgaduras que afectan a las rocas mesozoicas, por lo que se piensa que la deformación se desarrolló antes del depósito de las rocas volcánicas, es decir, durante el Cretácico Superior-Terciario Inferior.

Posteriormente se desarrolla una fase de deformación extensiva que produce fallamiento normal generando fosas y pilares en dirección general NNE-SSW. Bajo este ambiente de arco magmático se desarrollaron las condiciones metalogenéticas que enmarcaron el emplazamiento de la mayoría de los depósitos de minerales durante el Oligoceno-Mioceno.

Los lineamientos de mayor importancia presentan rumbos NNE y NNW, con longitudes de 5 a 50 km y los curvilineamientos de 5 a 10 km de diámetro. Asociadas a estas estructuras se presentan zona mineralizadas como es el distrito minero de Zacatecas (Carta Geológico-Minera Zacatecas F13-6, escala 1:250,000. SGM 1997).

El dominio estructural del área es producto de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide y de diversos eventos distensivos, manifestados durante el Cenozoico, como producto del reajuste en el movimiento de las placas tectónicas que afectaron las rocas mesozoicas y cenozoicas de la región.

Las rocas metamórficas del Triásico Superior, en el distrito minero de Zacatecas, presentan por lo menos dos eventos de deformación con metamorfismo regional de bajo grado.

La presencia de contactos miloníticos, foliación casi plana, alargamiento y rotación de minerales y plegamiento isoclinal, son indicadores que estas rocas sufrieron un transporte tectónico y cabalgamiento con dirección noroeste.

Se presentan estructuras que corresponden a procesos de deformación dúctil-frágil y frágil; la primera es originada por mecanismos compresivos regionales (orogenia Laramide), representados por cabalgaduras y plegamientos; la deformación frágil está representada por fallas originadas por procesos distensivos post-laramídicos.

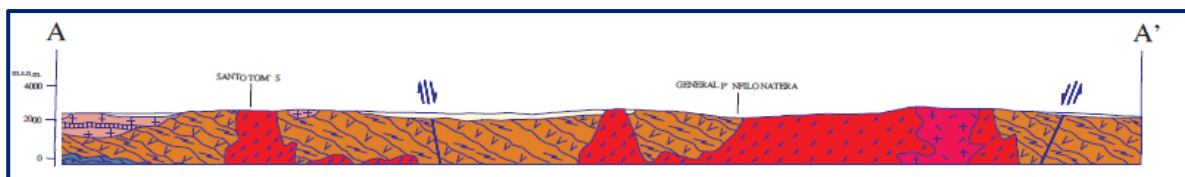
La región se caracteriza por una zona de contactos tectónico entre los terrenos Guerrero y Sierra Madre, el contacto tectónico se considera como una zona de cizalla frágil-dúctil de varios kilómetros de ancho, originada por la acreción de ambos elementos tectonoestratigráficos, que se extiende desde Durango hasta la sierra de San Miguelito en SLP, y cruza la zona en el sector sureste y noreste con una dirección NE-SW; a esta zona de cizalla, Sabanero-Sosa et al. (1999), la denominaron Megacizalla Durango-Zacatecas (Carta Geológico-Minera Salinas de Hidalgo F14-A61, escala 1:50,000, SGM, 2007).

4.3 Geología del subsuelo

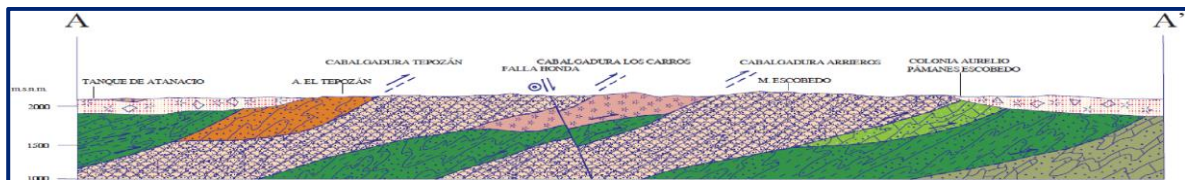
De acuerdo con la información geofísica obtenida en estudios previos, los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y la correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y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

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias (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.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento, por rocas metamórficas y metasedimentarias, las secuencias vulcanosedimentarias de formaciones Zacatecas y Chilitos, las rocas arcillosas del Cretácico Inferior y localmente por rocas intrusivas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-6, Zacatecas. Esc. 1:250,000 (SGM, 1997)



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-A61, Salinas de Hidalgo. Esc. 1:50,000 (SGM, 2007)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, así como la correlación con otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado.

La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría variada, depósitos lacustres y conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos metros en el centro del valle, debajo de ellos se presentan areniscas y lutitas fracturadas. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región.

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 valle se pueden distinguir tres medios diferentes por donde 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

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se analizó la información de 27 pruebas de bombeo de corta duración realizadas en estudios previos (SRH, 1974), y otras más en acuíferos vecinos que tienen el mismo, origen, evolución y constitución geológica, 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 **2.0×10^{-5} a $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; y los valores de conductividad hidráulica, considerando un espesor saturado de 100 m, entre **2.7×10^{-7} y $2.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.02 a 2.3 m/d)**. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

Sin embargo, para fines del balance de aguas subterráneas se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.05**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios previos así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 1997-2015, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2015 mostró valores que variaban, de manera general, de 30 a 100 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan. Los niveles estáticos más someros, de 30 a 50 m, se presentan en la porción central del acuífero, entre el poblado Santo Tomás Venaditos en el sur y el límite con el estado de San Luis Potosí en el norte, en torno de las lagunas Santa Elena (o El Sapo), El Tule, Las Pilas y El Salado, que están alineadas en dirección suroeste-noreste. Los valores más profundos, de 90 a 100 m, se registran hacia los flancos montañosos ubicados al noroeste y sureste (figura 4).

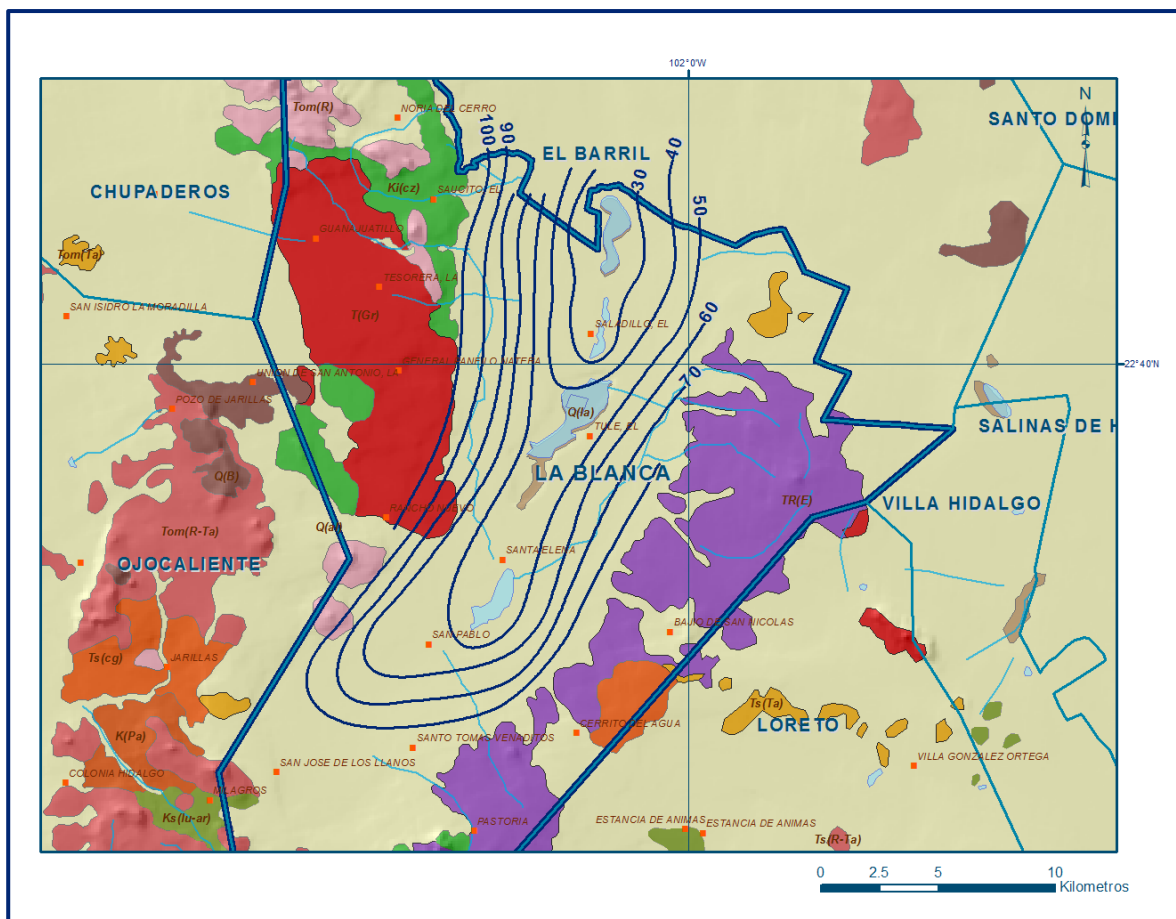


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2015 registró valores que variaron de 2,100 a 1,980 msnm, los cuales decrecen gradualmente, por efecto topográfico, al igual que las profundidades, desde la porción suroccidental del acuífero

hacia el valle aluvial localizado en la región centro y continuar al noreste, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo suroeste-noreste, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental, entorno de las lagunas que están orientadas en esta misma dirección.

De esta manera, las menores elevaciones, de 1,980 a 2,000 msnm, se registran en la porción central del valle, englobando las lagunas; en tanto que las mayores elevaciones, de 2,070 a 2,100, se presentan hacia las estribaciones de las sierras y lomeríos que lo delimitan (figura 5).

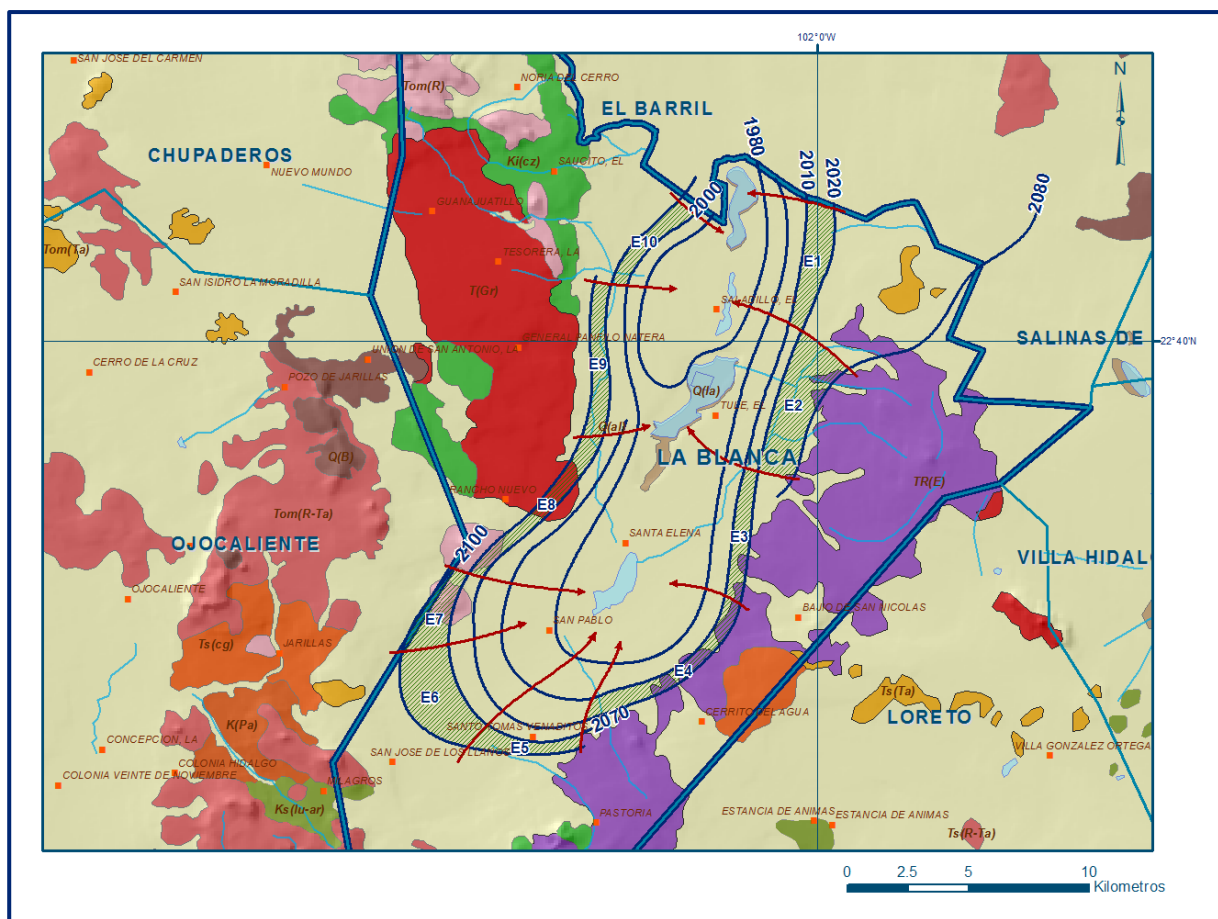


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1997-2015 registró valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie del acuífero, que variaron de 3 a 15 m, que representan 0.2 a 0.8 m anuales, con valores puntuales de hasta 20 m; el abatimiento promedio es de 0.7 m anuales. Los máximos abatimientos se registran en la porción centro-norte del acuífero, donde se localiza la zona agrícola; en la

superficie restante los abatimientos decrecen hacia las estribaciones de las sierras limítrofes, hasta desaparecer (figura 6).

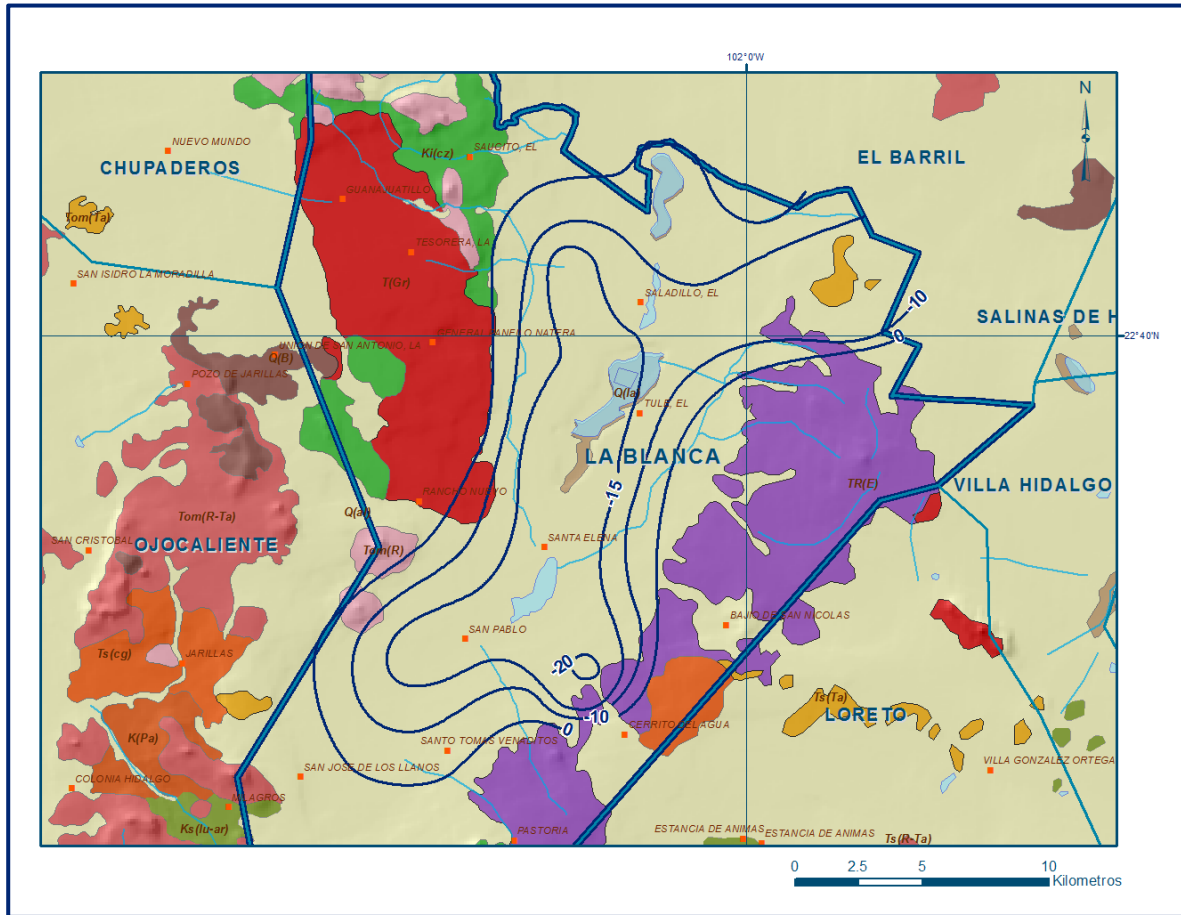


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (1997-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No existe información hidrogeoquímica reciente solo la que se refiere al estudio realizado en el año 1983 (SARH) y 2015 por Álvarez R.W. en su Tesis de Maestría de la Universidad Autónoma de Zacatecas, en los que se colectaron 49 y 3 muestras de agua subterránea, respectivamente, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación.

Para su análisis fisicoquímico correspondiente y para la caracterización hidrogeoquímica. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se concluye que los valores de concentración de STD variaron de 327 a 1184 mg/l, únicamente tres muestras superaban el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la 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 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 fueron inferiores a 2000 μ S/cm y presentan valores extremos de 550 a 1850 μ S/cm. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se incrementan hacia al centro y norte del acuífero, en dirección sur-norte, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Los valores más bajos se presentan en la región sur y en los flancos oriental y occidental del acuífero, donde se ubican las principales zonas de recarga. Los valores de temperatura variaron 24.8 a 26.8 °C y el pH de 6.6 a 8.6, que se considera ligeramente alcalina.

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 del agua que predomina es la bicarbonatada-mixta, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas y 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 se clasifican como C_2-S_1 que representa contenido medio de sales y baja concentración de sodio, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos más reciente llevado a cabo por la Comisión Nacional del Agua en 2009, se registraron un total de 671 obras que aprovechan el agua subterránea, 250 pozos y 421 norias; de las cuales 523 están activas y 148 se consideran inactivas. De las obras activas, 205 se destinan al uso agrícola, 27 para uso público-urbano y 291 para usos doméstico y pecuario.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **26.1 hm³ anuales**, de los cuales 24.2 hm³ (92.7 %) se destinan al uso agrícola, 1.7 hm³ (6.5%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 0.2 hm³ (0.8%) para usos pecuario y doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1997-2015, en una superficie de **243 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 del 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 (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que el volumen utilizado para uso público-urbano es pequeño, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Rr: Recarga Incidental por retornos de riego

B: Bombeo

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

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

$$R_v = B + \Delta V(S) - E_h - R_r \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas 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 e 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 2015 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

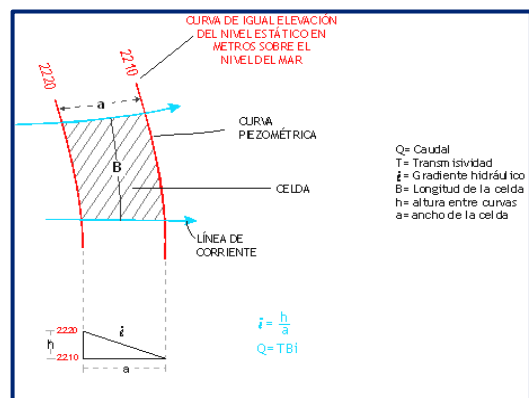
Donde:

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 **12.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2015)

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	5430	1095	10	0.0091	0.0005	0.0248	0.8
E2	6570	2100	60	0.0286	0.0001	0.0188	0.6
E3	4905	965	10	0.0104	0.0003	0.0152	0.5
E4	6655	875	10	0.0114	0.0001	0.0076	0.2
E5	4815	965	30	0.0311	0.0005	0.0748	2.4
E6	5080	1925	30	0.0156	0.0005	0.0396	1.2
E7	4555	1225	30	0.0245	0.0003	0.0335	1.1
E8	4905	700	50	0.0714	0.0002	0.0701	2.2
E9	8060	1050	50	0.0476	0.0002	0.0768	2.4
E10	5780	790	20	0.0253	0.0003	0.0439	1.4
Total entradas							12.8

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, adaptados al espesor saturado de cada zona

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 5 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea de 30 a 60 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo.

De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 24.2 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 1.2 hm³ anuales. **Rr = 1.2 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente de manera artificial por bombeo (B).

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 **26.1 hm³ anuales**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 1997-2015 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.05, 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)

Como consecuencia de la explotación, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciando una variación negativa del almacenamiento.

El volumen de agua drenado en el intervalo 1997–2015, fue de 128.3 hm³, que representa un promedio anual de **-7.1 hm³** (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (1997-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -10	-5.0	86.5	0.05	-21.6
-10 a -15	-12.5	86.8	0.05	-54.3
-15	-15.0	69.0	0.05	-51.8
-20	-20.0	0.7	0.05	-0.7
Área de balance		243.0	TOTAL	-128.3
		Promedio anual		-7.1

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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + \Delta V(S) - E_h - R_r \\ R_v &= 26.1 - 7.1 - 12.8 - 1.2 \\ R_v &= 5.0 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 5.0 + 12.8 + 1.2 \\ R &= 19.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego.

Para este caso su valor es **19.0 hm³/año**, de los cuales 17.8 hm³ son recarga natural y 1.2 hm³ recarga incidental.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero, no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 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 (REPDa), 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 **29,653,091 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 19.0 - 0.0 - 29.653091 \\ \text{DMA} &= -10.653091 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **10,653,091 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1997. Estudio para la Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico de los Acuíferos de los valles de Calera - Benito Juárez, Chupaderos, Guadalupe Bañuelos, Cuenca del Aguanaval, Ojocaliente y La Blanca, Zacatecas. Realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2000. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Loreto, estado de Zacatecas.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1974. Estudio Geohidrológico Preliminar en la Zona de La Blanca, estado de Zacatecas. Realizado por Consultores, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1983. Estudio Geohidrológico de la Zona “La Blanca”, estado de Zacatecas. Realizado por Bufete Geológico y Ciencias Afines S.A.