

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LORETO (3229), 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	8
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía.....	12
4.2	Geología estructural	19
4.3	Geología del subsuelo	20
5	HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1	Tipo de acuífero	21
5.2	Parámetros hidráulicos.....	21
5.3	Piezometría	22
5.4	Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	22
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
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	28
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	29
7.2	Salidas.....	30
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	30
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	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 (DMA).....	33
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 Loreto, definido con la clave 3229 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Aguascalientes; entre los paralelos 21°12' y 22° 37' de latitud norte y entre los meridianos 101°52' y 102° 07' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 689 km²

Limita al norte y noreste con el acuífero La Blanca, al norte y noroeste con Villa Hidalgo; al sureste con el acuífero Villa García; al oeste con Ojocaliente; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; y al sur con el acuífero Valle de Chicalote, perteneciente al estado de Aguascalientes (figura 1).

Geopolíticamente el área que cubre el acuífero comprende parcialmente los municipios Loreto, Noria de Ángeles y González Ortega así como pequeñas porciones de los municipios de Ojocaliente, Villa García y Luis Moya.

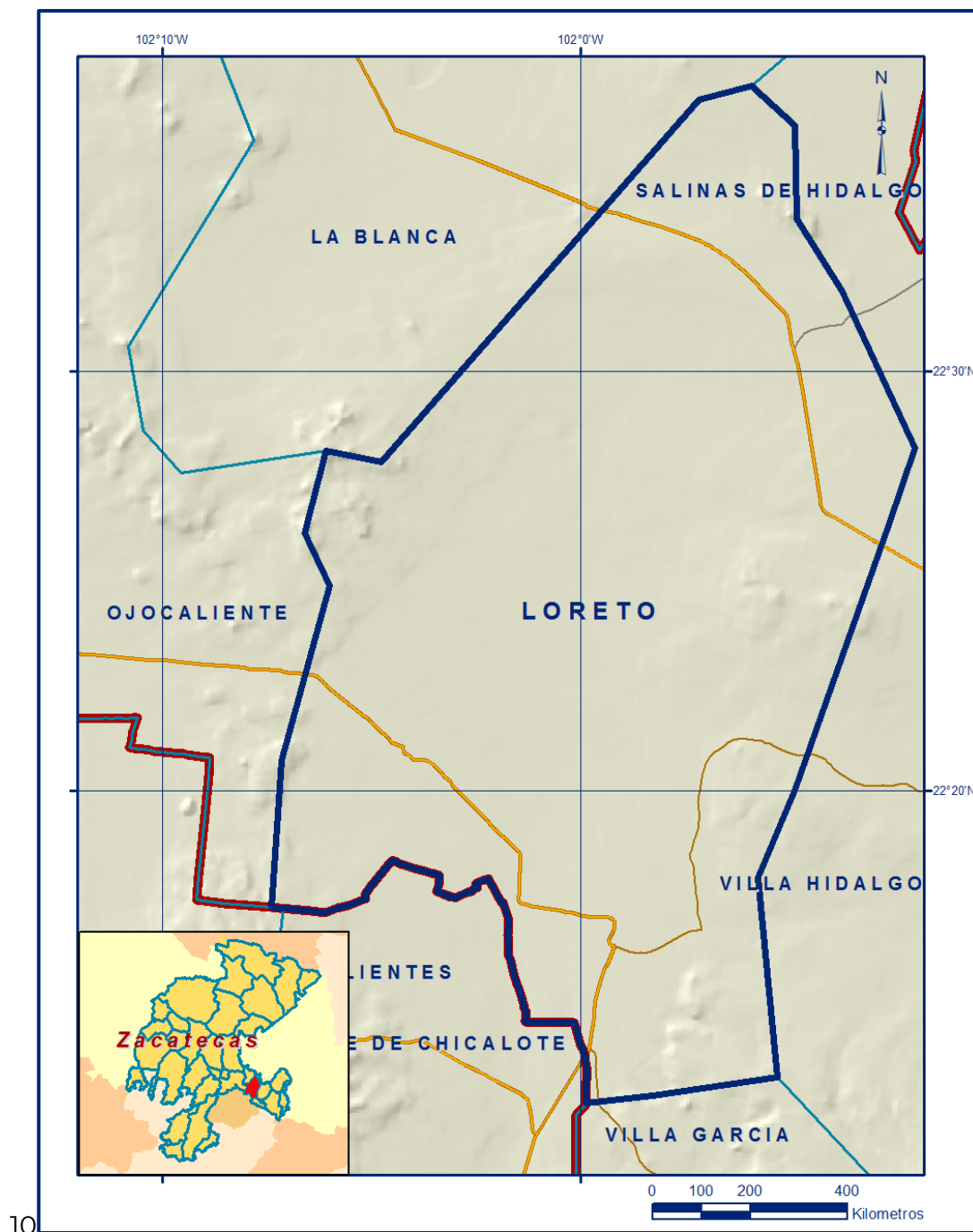


Figura 1. Localización del Acuífero

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

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

ACUÍFERO 3229 LORETO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	54	53.7	22	35	53.0	
2	101	54	50.7	22	33	39.4	
3	101	53	45.4	22	31	55.6	
4	101	52	16	22	28	10.1	
5	101	52	38.2	22	26	22.8	
6	101	54	53.0	22	20	0.8	
7	101	55	46.1	22	17	54.8	
8	101	55	17.9	22	13	9.9	
9	101	58	16.7	22	12	43.2	
10	101	59	52.6	22	12	32.7	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	102	7	6.5	22	17	11.7	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	102	7	23.6	22	17	13.1	
13	102	7	8.7	22	20	43.4	
14	102	6	0.2	22	24	53.5	
15	102	6	35.4	22	26	9.5	
16	102	6	5.7	22	28	6.2	
17	102	4	46.1	22	27	51.4	
18	101	57	10.3	22	36	29.4	
19	101	55	56.0	22	36	49.3	
1	101	54	53.7	22	35	53.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca 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. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda; el primero rige en casi la totalidad de superficie del acuífero 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 una pequeña porción de la región suroccidental 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 DEL VALLE DE LORETO, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Ingeniería y Geotecnia S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), en el año 1970. 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 sobreexplotación, ya que la recarga total media anual fue de 30 hm³/año, mientras que la extracción por bombeo ascendió a 68 hm³/año.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL VALLE DE LORETO, EN EL EDO. DE ZACATECAS. Realizado por Consultores S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en el año 1980.

Consistió en una actualización de un estudio anterior incluyendo además exploraciones geofísicas.

Los resultados del balance confirman que el acuífero se encontraba ya en condición de sobreexplotación, con una recarga total media anual de 49.0 hm³ y una extracción por bombeo de 68.0 hm³/año.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA LORETO, ZAC., Reporte interno realizado por la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal Zacatecas, en el año 1996. Este trabajo tuvo como objetivo la actualización del censo de aprovechamientos y del balance de aguas subterráneas.

Concluye que el acuífero se encontraba en condición de sobreexplotación; el volumen de recarga media anual que recibe el acuífero se estimó en 52 hm³/año, inferior a las extracciones por bombeo calculadas en 81.4 hm³/año, lo que muestra un desequilibrio en el sistema del orden de 29.4 hm³/año.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE LORETO. Realizado mediante por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 1998. Los trabajos contemplaron actualizar el conocimiento del flujo subterráneo y las mediciones piezométricas en pozos de la red de monitoreo para elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, tomando en cuenta para ésta última información del año 1990.

Recomienda la construcción de 3 piezómetros, por lo que la red total de la zona de estudio se conformaría por 33 sitios o nodos, separados entre sí a distancias que varían de 2 a 6 km.

ESTUDIO DE INSTRUMENTACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS OJOCALIENTE, LORETO Y VILLA HIDALGO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Elaborado por la Universidad Autónoma de Zacatecas, para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2013. Los objetivos generales fueron seleccionar pozos de la red de monitoreo e instalar transductores de presión en forma permanente, para registrar de manera programada y automática las variaciones de los niveles del agua subterránea en forma simplificada y confiable, determinar su evolución en el tiempo como resultado de las variables que intervienen en el proceso de recarga y descarga y conocer su condición actual. Con la piezometría recabada y la histórica se elaboraron las configuraciones del nivel estático, que junto con la información de tipo hidrogeológico generada y recopilada se utilizó para actualizar el balance de aguas subterráneas, para calcular la recarga media anual que recibe el acuífero y determinar su disponibilidad.

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 LORETO, 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 de Ojuelos-Aguascalientes y la porción norte en la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas.

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 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. 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.

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 prevalece el clima semiseco templado B_s1kw.

Es 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), 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.

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 cuenta con información de 4 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: Sierra Vieja, Guadalupe Victoria, Villa González Ortega y Loreto.

Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más largo 1963-2012 y el más corto 2004-2012, y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **397.4 mm**, **17.1 °C** y **2,056.5**, 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.

Entre los arroyos de mayor importancia destacan El Muerto, San Patricio, El Jaral y Las Blancas; en la porción sur de la zona existen corrientes que escurren hacia el Valle de Chicalote, en el estado de Aguascalientes.

Los tipos de drenaje que se observan son de tipo dendrítico, paralelo y subparalelo; el primero se presenta en las regiones montañosas y los últimos en los valles y planicies, donde llegan a desaparecer.

Los arroyos son de carácter torrencial, únicamente tienen escurrimientos durante la época de lluvias y descargan en pequeñas lagunas, presas y bordos diseminados en toda el área. Al este de Loreto se ubica la Presa San Marcos, que recibe los escurrimientos de los arroyos El Muerto, Blanco y Gatera; esta es la obra hidráulica más importante de la zona, con una capacidad de almacenamiento de 5 hm³/año, para riego de 352 hectáreas.

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 norte por bajadas aluviales, al poniente por lomeríos de pie de monte con mesetas, al suroeste se presenta una sierra baja con mesetas, al oriente se observa una pequeña sierra abrupta y al sureste los rasgos corresponden a una mesa extensa.

En el extremo sur existe un puerto topográfico labrado en rocas riolíticas y en la porción nororiental las sierras no son continuas, y en ella existen angostas llanuras que comunican con otras planicies.

Las mayores elevaciones se presentan en la región noroccidental, en el Cerro La Biznaga, con una elevación de 2,400 msnm y en las sierras de Asientos y de San Marcos, donde se presentan elevaciones del orden de 2,500 msnm.

La elevación del llano oscila entre 2,030 y 2,100 msnm y está orientado en dirección preferencial norte-sur.

La sierra localizada en la porción occidental, tiene forma alargada orientada norte-sur y su elevación aproximada es de 2,300 msnm. En la porción norte, cerca del poblado Pastoría, destaca una elevación topográfica dentro de la sierra, que corresponde a un intrusivo granítico. En la porción centro-sur se presentan materiales de pie de monte, que conforman lomeríos redondeados de suave pendiente.

En la porción sureste se encuentra una sierra formada esencialmente por rocas de composición riolítica, las cuales presentan formas relativamente suaves. Al norte, las elevaciones topográficas corresponden a afloramientos de calizas y lutitas, en forma de lomeríos redondeados de pendientes suaves, separados por llanuras aluviales.

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 metamorizadas 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 metamorizada 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 FI3-6, 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 cortan la secuencia volcánica terciaria y afloran de manera restringida, son de composición granítica, granodiorítica y diorítica. 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 en algunos sitios.

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).

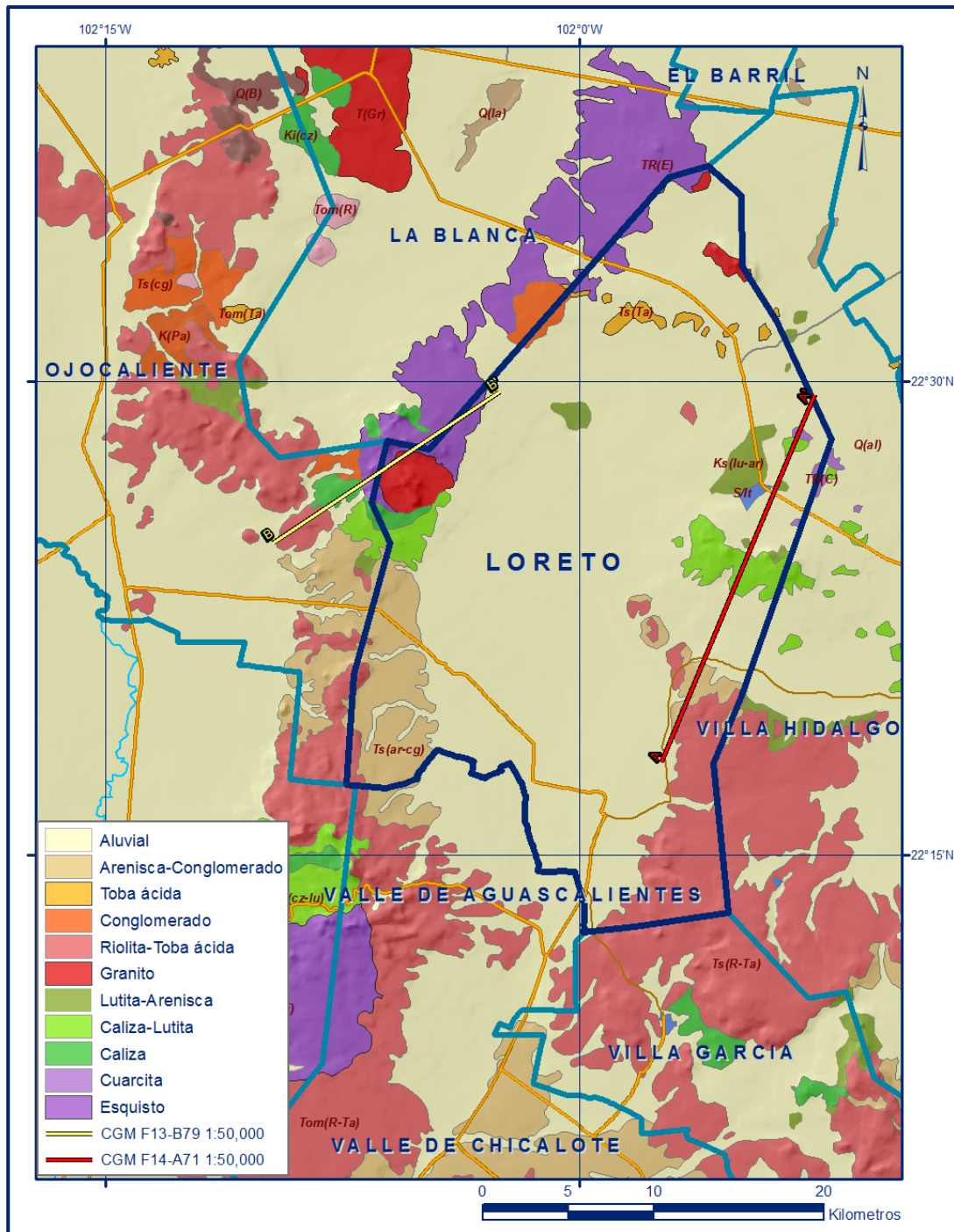


Figura 2. Geología general del acuífero

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.

Aflora principalmente en las sierras plegadas de la porción norte, en donde sus contactos estratigráficos con la unidad inferior, Formación Taraises, y superior, Formación La Peña y la Formación Cuesta del Cura, son concordantes. Su espesor promedio en esta área se ha estimado entre 350 y 500 m. Su depósito ocurrió en una plataforma lagunar de aguas someras y tranquilas, templadas a cálidas, con buena oxigenación y poca influencia de arcillas, lo que permitió el desarrollo y crecimiento de abundantes organismos.

Formación La Peña

Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca.

En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada. Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte guía ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido.

Sus afloramientos en el área del acuífero representan franjas de espesor reducido, asociadas a la Formación Cupido, a la cual sobreyace concordantemente. A su vez, es cubierta concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. Aflora en el área del acuífero en la porción noroccidental de la Sierra de Guadalupe. 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 noroccidental del área, sobre todo 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 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 la Sierra de Guadalupe. 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, 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 una 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 oeste del acuífero, cerca de Saucedo de Mulatos y Vistas Negras.

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 al sureste del acuífero, cerca de los poblados San Blas, Alvarado y Crisóstomos. 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 consolida de origen aluvial y fluvial, constituida por depósitos recientes formados por sedimentos de formas subredondeadas a redondeadas que son producto de erosión de las rocas existentes y que rellenan los valles y márgenes de ríos y arroyos; así como como por los depósitos residuales y de piedemonte. 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.

4.2 Geología estructural

Las rocas metamorfizadas 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.

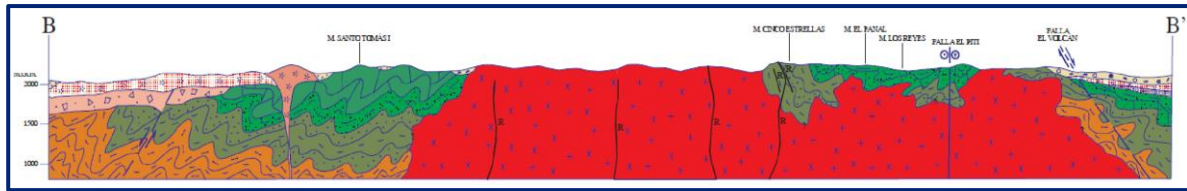
La presencia de contactos miloníticos, foliación casi plana, alargamiento y rotación de minerales y plegamiento isoclinal, son indicadores que estas rocas sufrieron un transporte tectónico y cabalgamiento con dirección noroeste.

4.3 Geología del subsuelo

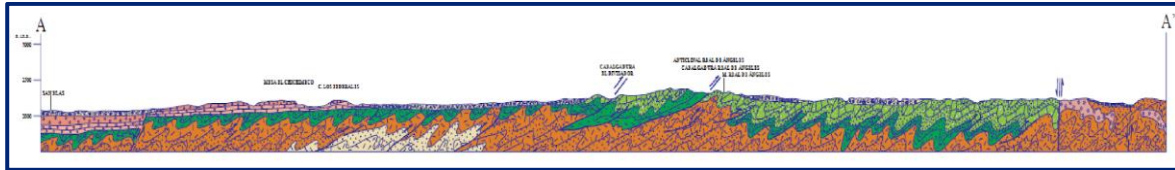
De acuerdo con la información geofísica obtenida en estudios previos, los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y la correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y 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 las formaciones Zacatecas y Chilitos, las rocas arcillosas del Cretácico Inferior y localmente por rocas intrusivas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-B79, Luis Moya. Esc. 1:50,000 (SGM, 2001)



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-A71, Loreto. Esc. 1:50,000 (SGM, 2002)

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, conglomerados y depósitos lacustres, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros en el centro del valle tectónico.

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 38 pruebas de bombeo de corta duración realizadas en estudios previos (SHR, 1970 y SARH, 1980), 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 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; si consideramos un espesor saturado promedio de 60 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **3.3×10^{-7} a $1.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.03 a 1.4 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 **0.08**.

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 del estudio realizado en 2013 así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años previos.

Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 1998-2015, 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 40 a 140 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 40 a 50 m, se presentan en la porción norte del acuífero, al este del poblado Estancia de Ánimas; en tanto que los más profundos, de 100 a 140 m, se registran en el flanco oriental, en la zona comprendida entre Loreto y San Marcos, hasta las inmediaciones de Noria de Ángeles. En la zona agrícola la profundidad al nivel estático varía de 70 a 90 m (figura 4).

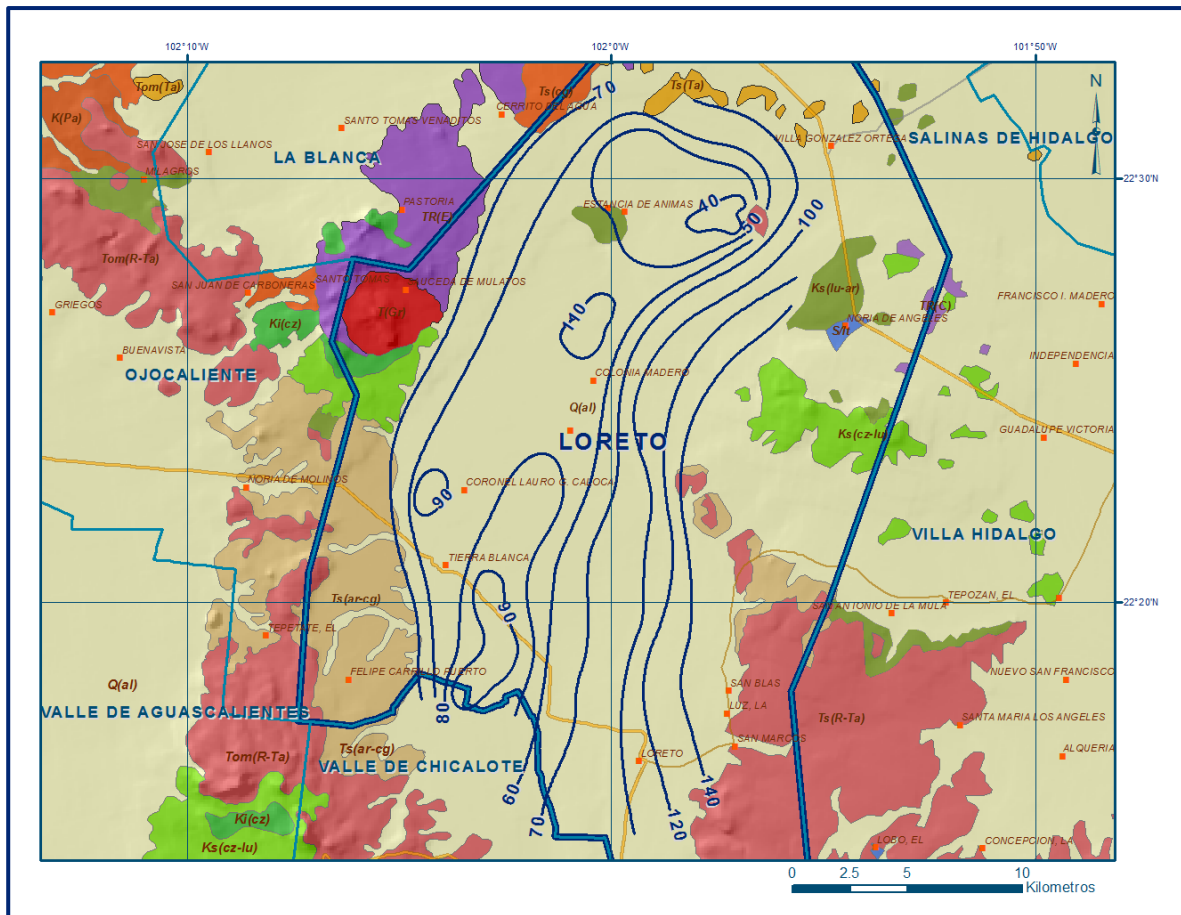


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

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 1,920 msnm, los cuales decrecen gradualmente, por efecto topográfico, al igual que las profundidades, desde la porción norte del acuífero hacia el valle aluvial localizado en la región centro y continuar hacia el sur, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental.

En la porción sur del acuífero, se ha formado un extenso cono de abatimiento, entre Loreto y Tierra Blanca, induciendo también flujo subterráneo procedente del acuífero vecino Valle de Chicalote, en el estado de Aguascalientes.

De esta manera, las menores elevaciones, de 1,920 a 1,940 msnm, se registran en la porción sur del acuífero, entre los poblados Loreto y Tierra Blanca; en tanto que las mayores, de 2070 a 2100, se presentan al norte, entorno del poblado Estancia de Ánimas (figura 5).

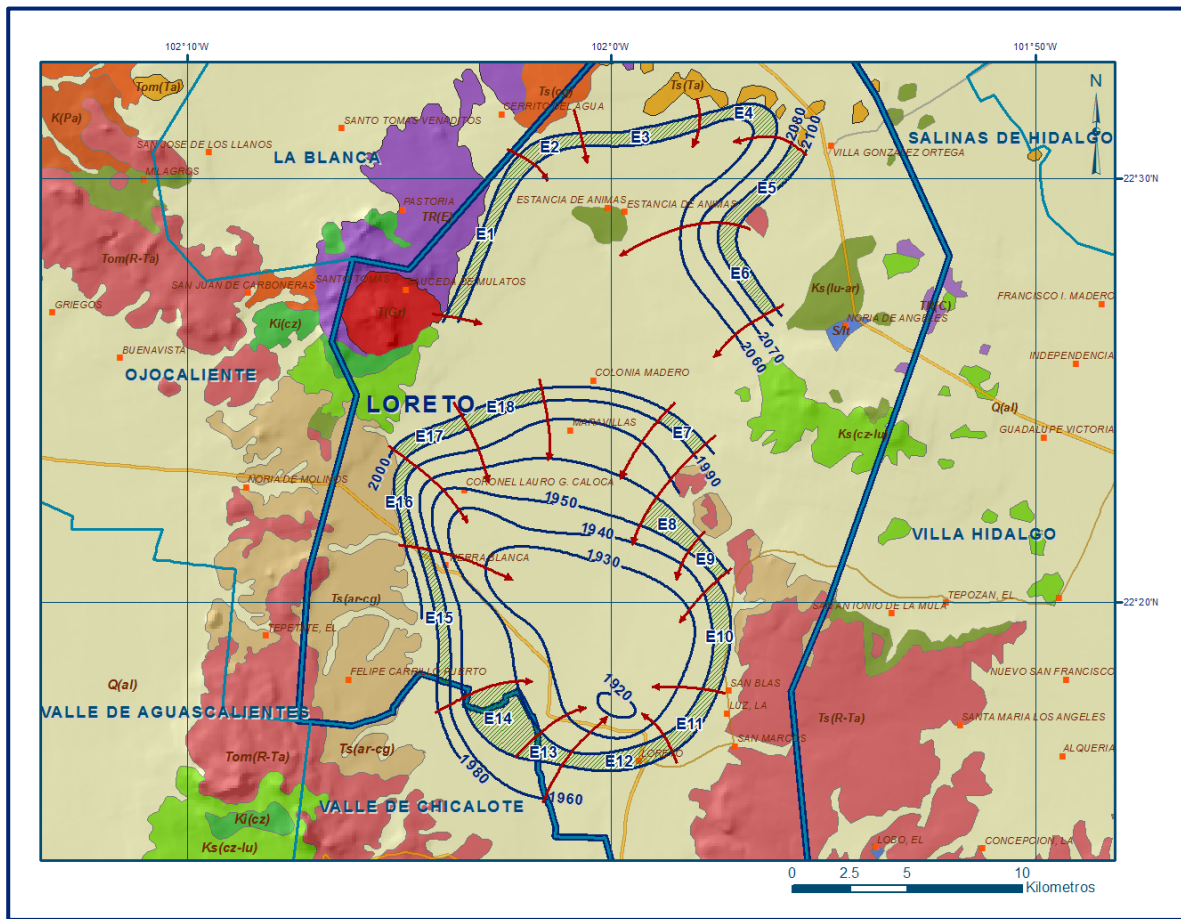


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1998-2015 registró valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie del acuífero, que varían de 5 a 40 m, que representan 0.3 a 2.4 m anuales, con valores locales hasta de 50 m.

Es muy notable el extenso cono de abatimiento que se ha formado en la región comprendida entre las poblaciones Loreto, Tierra Blanca y Madero, en donde se ubica la región agrícola de extracción intensiva.

En esta zona el abatimiento medio anual es de 2.4 m. En la superficie restante del acuífero, el ritmo de abatimiento varía de 0.3 a 1.2 m anuales (figura 6).

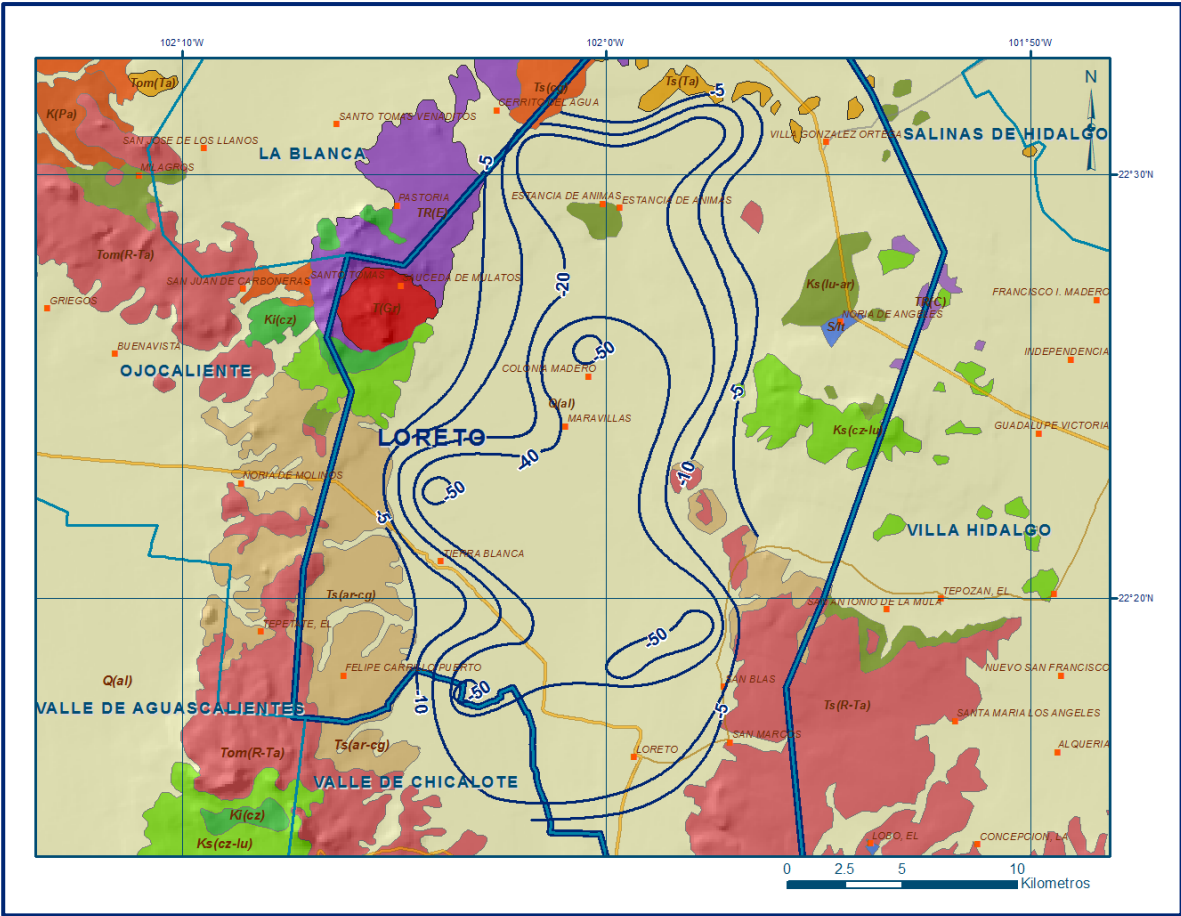


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (1998-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La información más reciente se refiere al estudio realizado en el año 2015 por Álvarez R.W. en su Tesis de Maestría de la Universidad Autónoma de Zacatecas, en el que se colectaron 15 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.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaban de 350 a 500 mg/l, que no superan 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 son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presentan valores extremos de 595 a 1130 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran al sur del acuífero y se incrementan en dirección general norte-sur, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Los valores más bajos se presentan en la región norte y en los flancos oriental y occidental del acuífero, donde se ubican las principales zonas de recarga. Los valores de temperatura varían de 23.5 a 32.7 °C y el pH de 7.0 a 7.8, por lo que se concluye que el agua 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-sódica, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

En menor proporción se identificó la familia mixta sódico-bicarbonatada, en la porción central del valle.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), casi la totalidad de las muestras de agua clasifican como C_2S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

En menor proporción, las aguas pertenecen a la clasificación 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, lavados periódicos y/o cultivos tolerantes a la salinidad.

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 1,132 obras que aprovechan el agua subterránea, 612 pozos y 520 norias; de las cuales 777 están activas y 355 se consideran inactivas.

De las obras activas, 596 se destinan al uso agrícola, 35 para uso público-urbano, 141 más para usos doméstico y pecuario y 5 para uso industrial.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **81.4 hm³ anuales**, de los cuales 73.6 hm³ (90.4 %) se destinan al uso agrícola, 2.5 hm³ (3.1%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.2 hm³ (0.2%) para usos pecuario y doméstico y 5.1 hm³ (6.3%) para uso industrial.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1998-2015, en una superficie de **345 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 el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en la llanura y por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en 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 (R_r).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_r : 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 (E_h)

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

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

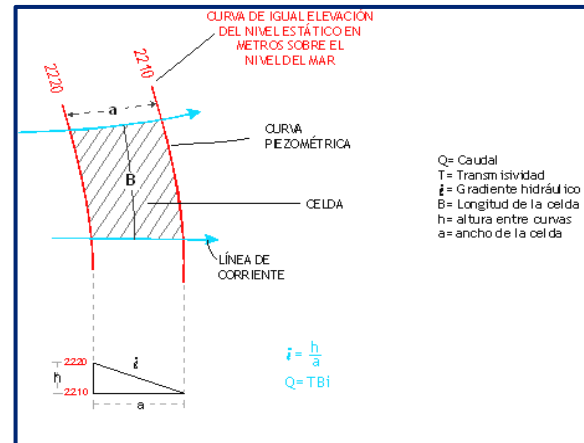
Donde:

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 **26.4 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

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 mayor a 50 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 73.6 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 3.7 hm³ anuales. **Rr = 3.7 hm³ anuales.**

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	6665	555	10	0.0130	0.0008	0.0961	3.0
E2	2775	900	10	0.0111	0.0005	0.0154	0.5
E3	4860	765	10	0.0131	0.0005	0.0338	10
E4	2640	900	10	0.0111	0.0010	0.0293	0.9
E5	4305	765	20	0.0261	0.0005	0.0563	18
E6	4165	835	20	0.0240	0.0005	0.0499	16
E7	2015	765	10	0.0131	0.0004	0.0105	0.3
E8	2430	970	10	0.0103	0.0015	0.0376	12
E9	2085	695	10	0.0144	0.0015	0.0450	14
E10	3610	555	10	0.0130	0.0010	0.0650	2.1
E11	3750	625	10	0.0160	0.0012	0.0720	2.3
E12	4445	1180	10	0.0085	0.0012	0.0452	14
E13	2085	1040	10	0.0096	0.0005	0.0100	0.3
E14	2570	1945	10	0.0051	0.0005	0.0066	0.2
E15	6250	625	20	0.0320	0.0002	0.0400	13
E16	4170	695	10	0.0144	0.0013	0.0780	2.5
E17	3470	695	10	0.0144	0.0018	0.0899	2.8
E18	2915	835	10	0.0120	0.0016	0.0559	18
TOTAL							26.4

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

7.2 Salidas

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

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **81.4 hm³ anuales**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 1998-2015 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.08, 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 del recurso, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciando una variación negativa del almacenamiento. El volumen de agua drenado en el intervalo 1998 – 2015, fue de -827.2 hm³, que representa un promedio anual de **-48.7 hm³** (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (1998-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-5 a -10	-7.5	42.3	0.08	-25.4
-5 a -20	-22.5	7.0	0.08	-12.6
-10 a -20	-15.0	50.3	0.08	-60.4
-20 a -40	-30	131.4	0.08	-315.4
-40 a -50	-45.0	106.2	0.08	-382.3
-50	-50.0	7.8	0.08	-31.2
Área de balance		345.0	TOTAL	-827.2
		Promedio anual		-48.7

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:

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

$$R_v = 81.4 - 48.7 - 26.4 - 3.7$$

$$R_v = 2.6$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 2.6 + 26.4 + 3.7$$

$$R = 32.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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 **32.7 hm³/año**, de los cuales 29.0 hm³ son recarga natural y 3.7 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 **82,116,281 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 32.7 - 0.0 - 82.116281 \\ \text{DMA} &= -49.416281 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **49,416,281 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1998. Estudio para la Reactivación de Redes de Monitoreo del Acuífero del Valle de Loreto, 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), 1970. Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Loreto. Realizado por Ingeniería y Geotecnia S.A.