



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ALDAMA-SAN DIEGO (0836),
ESTADO DE CHIHUAHUA**

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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica.....	5
3.2Clima.....	6
3.3Hidrografía	6
3.4Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía	8
4.2Geología estructural.....	11
4.3Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero	14
5.2Parámetros Hidráulicos	15
5.3Piezometría	15
5.4Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático	17
5.5Hidrogeoquímica y calidad del agua	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	19
7.1 Entradas.....	20
7.1.1 Recarga Vertical (Rv).....	20
7.1.2 Recarga por retornos de riego (Rr)	20
7.1.4 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	21
7.2Salidas	22
7.2.1 Descargas por manantiales (Dm).....	23
7.2.2 Bombeo (B).....	23
7.3Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	23
8. DISPONIBILIDAD	24
8.1 Recarga total media anual (R)	25
8.2Descarga natural comprometida (DNC).....	25
8.3Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	25
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	25
9. BIBLIOGRAFÍA	27

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 Aldama-San Diego, definido con la clave 0836 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 25' 00" y 29° 55' 0" de latitud norte y los meridianos 106° 00' 00" y 105° 28' 00" de longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 1,620 km². Colina al norte con el acuífero Laguna de Hormigas, al oriente con el Acuífero Potrero El Llano, al poniente con Villalba y Tabalaopa Aldama y al sur con Meoqui Delicias, todos ellos en el Estado de Chihuahua (Figura 1).

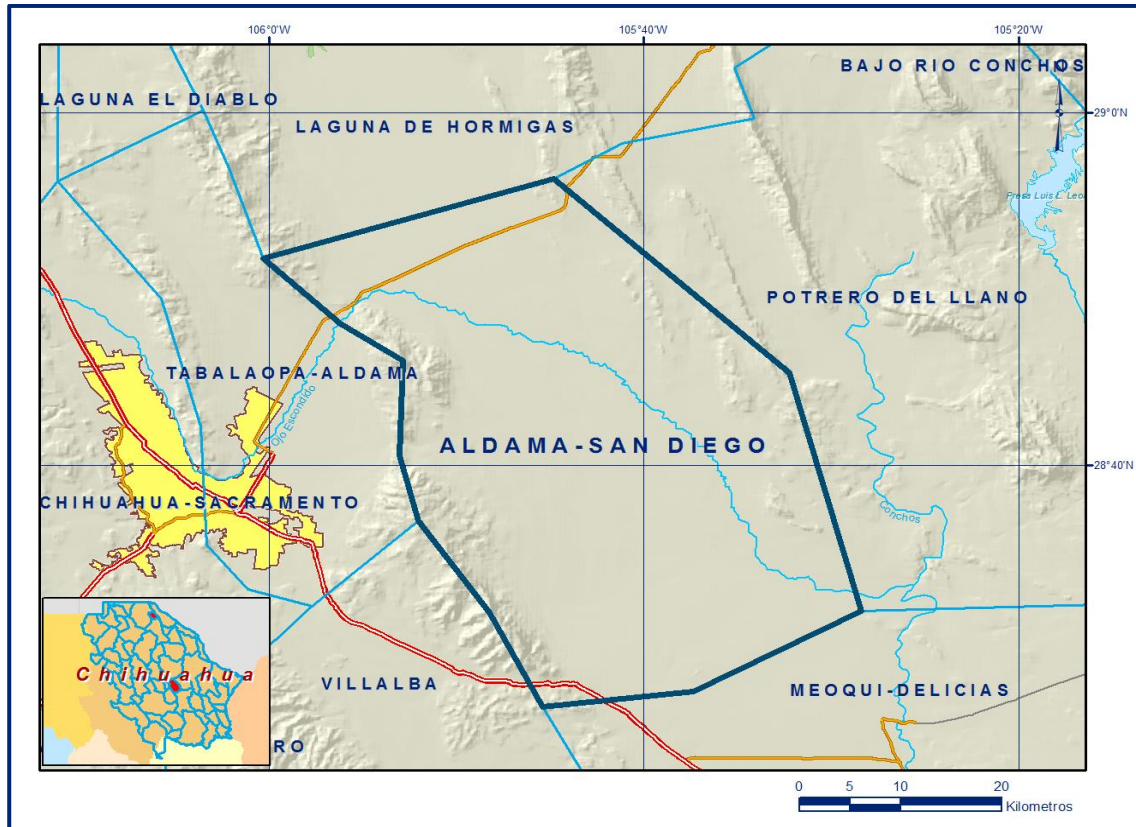


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios Aldama, Aquiles Serdán, Rosales, Chihuahua y Julimes. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0836 ALDAMA-SAN DIEGO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	105	45	24.7	28	26	16.3
2	105	48	15.5	28	31	38.7
3	105	52	3.0	28	36	50.8
4	105	53	3.3	28	40	30.8
5	105	52	50.6	28	45	55.1
6	105	56	10.6	28	48	2.4
7	106	0	19.5	28	51	45.2
8	105	44	48.6	28	56	15.6
9	105	32	14.7	28	45	13.3
10	105	28	25.5	28	31	43.7
11	105	37	21.5	28	27	9.2
1	105	45	24.7	28	26	16.3

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo. El territorio del acuífero está sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. La parte norte por el “*Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región circunvecina de Villa Aldama, Chih.*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 31 de diciembre de 1953. Esta veda se clasifica como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Y el resto del acuífero por el “*Decreto que establece veda, por tiempo indefinido, para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona de Delicias, Chih.*” publicado en el DOF el 16 de julio de 1962, esta veda se clasifica como tipo II, que sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El principal usuario es el agrícola. En la porción sureste de su territorio se encuentra un aparte del Distrito de Riego 005 “Ciudad Delicias” y a la fecha no existe Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos lo han cubierto de manera parcial y otros lo incluyen en estudios regionales, a continuación, se describen:

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA DE VEDA EN LA REGIÓN DE ALDAMA, elaborado por Ariel Construcciones S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1971. Describe las condiciones del acuífero en esa época.

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE LOS VALLES DEL SAUZ Y TABALAOPA, CHIH., PARA PROPORCIONAR AGUA EN BLOQUE A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, CHIH., realizado por PROYESCO, para la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1981. En este estudio se realizaron 60 sondeos eléctricos verticales para caracterizar el subsuelo, y se determinó que la zona de interés hidrogeológico se localiza en la parte oriente del acuífero y en las estribaciones de La Sierra Santo Domingo.

ACTIVIDADES GEOHIDROLÓGICAS EN LOS ACUÍFEROS: SANTA CLARA, ALDAMA SAN DIEGO, VILLALBA, CONEJOS MÉDANOS, TABALAOPA ALDAMA Y ALTO RÍO SAN PEDRO, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por Servicio Geológico Mexicano (SGM) para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2007. El objetivo principal fue elaborar un balance de aguas subterráneas y establecer la disponibilidad media anual de aguas subterráneas en los acuíferos Villalba, Alto Río San Pedro, Tabalaopa Aldama y Aldama San Diego, además de diseñar redes de monitoreo piezométrico en los acuíferos Santa Clara y Conejos Médanos.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de Provincias Fisiográficas propuesta por INEGI (1997), el área que comprende el acuífero se ubica entre las provincias Sierras y Llanuras del Norte y Sierra Madre Occidental

La provincia Sierras y Llanuras del Norte se subdivide en cuatro subprovincias que cubren la parte norte y oriente del estado de Chihuahua; *Llanuras y Médanos del Norte*, que ocupa la parte septentrional de esta provincia; *Sierras Plegadas del Norte* que recorre la fracción noreste del territorio estatal; *Del Bolsón de Mapimí* que es una franja que se ubica del centro hacia el sur del estado, y *Llanuras y Sierras Volcánicas* en la porción sureste de la provincia. Gran parte del acuífero queda comprendida en la subprovincia del Bolsón de Mapimí, en donde los rasgos del relieve tienen poca variedad ya que las llanuras se extienden por grandes distancias áridas y uniformes, sin otro cambio que su declive gradual hacia el oriente.

Una característica particular de la zona son la sierra Santo Domingo y San Ignacio (al oeste) y la sierra San Diego de Alcalá, Los Palmares y Cuesta del Infierno (al este) con una orientación preferencial noroeste sureste, formando éstos a su vez cuencas internas denominadas bolsones, cuyas pendientes suaves convergen a una amplia zona central de constitución arcillosa a limosa, conocida con el nombre de barreal o lago de Playa (shabka), que pueden estar ocupadas por pequeñas lagunas o charcas efímeras; como lo son lagunas de Tortuguillas, El Diablo y La Ciénega.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, el tipo de climas predominantes en la zona son dos tipos de climas: BWhw (w), (muy seco, semicálido con lluvias en verano), se presenta en la mayor parte del acuífero y se caracteriza por registrar temperaturas medias anuales mayores de 18° C, con precipitaciones medias anuales entre 300 y 400 mm. BWkw (w), (muy seco, templado con lluvias en verano), presenta una temperatura media anual entre 12.0° C a 18.0° C. El mes más frío registra temperaturas de -3 a 18° C, mientras que la temperatura media del mes más cálido es mayor de 18° C.

Se analizó la información de cuatro estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero, y se estimó que la temperatura media anual en la zona es de 19.8 °C; la precipitación media anual es de 317.9 mm/año, el ciclo de lluvias empieza en el mes de julio y termina a fines del mes de septiembre; la evaporación potencial media anual promedio es de 2,419 mm/año.

3.3 Hidrografía

En el acuífero las corrientes superficiales son efímeras y estacionales, en periodos de estiaje no existe flujo en los arroyos, mientras que en el río Chuvíscar existe un escurrimiento prácticamente continuo debido a la descarga de aguas tratadas que son arrojadas por plantas de tratamiento ubicadas en la Ciudad de Chihuahua. Los principales arroyos afluentes del río Chuvíscar son San Diego y Santa Eulalia. Se considera la región hidrológica de mayor relevancia ya que incluye al río Conchos como la corriente más importante del estado. En la porción centro y sur del acuífero, existe infraestructura de sistemas avanzados de riego (aspersión, goteo, etc.). Existen también canales (sobre todo al sureste del acuífero) revestidos y no revestidos que transportan agua a zonas de cultivo, donde predominan forrajes y nogal.

3.4 Geomorfología

Dentro del acuífero se localiza la Sierra San Diego de Alcalá de forma alargada y plegada con un rumbo preferencial de noroeste – sureste. El drenaje se encuentra constituido por arroyos que drenan de noreste a suroeste del tipo dendrítico-paralelo y radial de corto desplazamiento formando pequeños abanicos aluviales que desaparecen al pie del valle, mientras que algunos son tributarios al río Chuvíscar. Al norte de la Sierra San Diego de Alcalá, se localiza la loma Los Morados, se encuentra la Laguna Punta de la Sierra.

Al oriente del acuífero se encuentra la Sierra Los Palmares la cual está alineada con un rumbo preferencial noroeste-sureste, producto del evento distensivo de Cuencas y Sierras.

4. GEOLOGÍA

La secuencia estratigráfica contiene unidades cuya edad es desde el Precámbrico hasta el Reciente. El basamento sobre el que descansa la secuencia paleozoica está constituido por rocas graníticas y metamórficas del Precámbrico, sometidas a fases compresivas y distensivas que conforman grandes bloques emergidos y/o hundidos que en ocasiones denotan movimientos horizontales de transcurrancia o cabalgamiento, controlando la sedimentación y sus posteriores deformaciones (Figura 2).

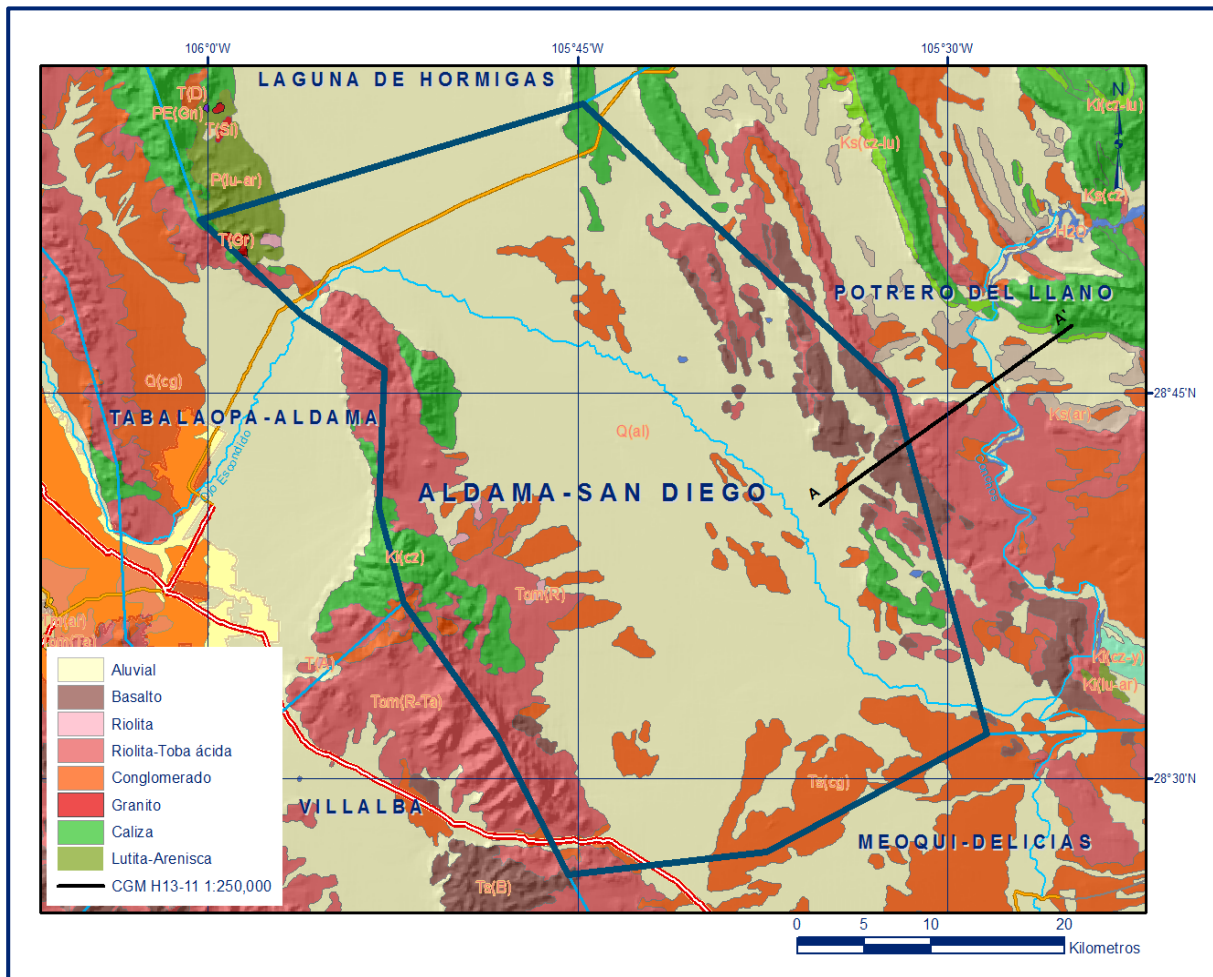


Figura 2. Geología general del acuífero

Las unidades recientes están compuestas por depósitos conglomeráticos y aluviales, al noreste del acuífero se reporta una serie de pliegues anticlinales y sinclinales en rocas cretácicas ocasionadas por el evento compresivo de la Orogenia Laramide. Estructuralmente el área presenta abundantes fallas normales de orientación noroeste-sureste, las cuales afectan a toda la secuencia estratigráfica, este fallamiento es producto del evento distensivo de Cuencas y Sierras.

4.1 Estratigrafía

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades que afloran en la zona.

Formación Rara

Esta formación está constituida por secuencia de rocas del triásico de tipo metalutitas y metareniscas de color gris, laminadas. Aflora en el Rancho Nachica y en los bancos de material para arcilla al noroeste de Aldama, extendiéndose hasta el Rancho Los Filtros. Presenta abundante plegamiento y fallamiento inverso. Es notable la presencia de fracturas de tensión rellenas de cuarzo lechoso, principalmente en los estratos de metarenisca, también rellenan planos de fallamiento inverso. Generalmente forma una serie de lomeríos de pendientes suaves. Su espesor no es mayor a los 1,200 m.

Grupo Aurora.

Formaciones Finlay y Tamaulipas

La Formación Finlay aflora en las inmediaciones de la mina San Antonio, se trata de caliza gris oscuro a negro de estratificación gruesa a masiva, con moderada silicificación, esporádicas capas dolomitizadas color café claro al intemperismo y café oscuro en fractura fresca, con estratos de 1.5 m de espesor, aisladas fracturas de 1 mm de espesor rellenas de hematita y calcita, exhibe moderado contenido de nódulos y bandas de pedernal negro, algunas capas contienen abundantes gasterópodos. Se encuentra intrusionada por un pórfido riolítico y cubierta en contacto tectónico por la Formación del Río, de igual forma se encuentra cubierta de forma discordante por basaltos y piroclastos.

Formación Tamaulipas Superior

Las rocas de la Formación Tamaulipas Superior están conformadas por calizas de color gris claro a crema y gris oscuro, de los tipos mudstone a wackstone, con textura rugosa y aspecto de piel de elefante. Presenta nódulos y lentes pequeños de pedernal de color negro a pardo rojizo.

En algunas porciones se observa con intercalaciones de lutitas con estratos delgados a gruesos y margas en forma de láminas. Ampliamente distribuidos en las cuencas Tampico-Misantla, Burgos y frente oriental de la Sierra Madre Oriental. El espesor de esta unidad llega a alcanzar hasta los 180 m, aunque ocasionalmente supera los 400 m (S. Muir, 1936).

Secuencia Volcánica Ácida

En esta unidad se asocian varias unidades litológicas, tales como: tobas de caída libre, flujos piroclásticos, tobas cristalovítreas, tobas líticas e ignimbritas (SGM, 2005); se trata de una intercalación de tobas y dominantes sedimentos vulcanoclásticos de edad Terciario Inferior, separados hacia la cima por una discordancia angular formada por tobas de ceniza y basalto.

Se encuentra constituida por una alternancia de horizontes vulcanoclásticos, conglomerado polimíctico, toba riolítica, limolita, arenisca y caliza. Al poniente de la mina San Antonio, está formada por una secuencia de estratos delgados de caliza crema de origen lacustre y limolita amarillo-ocre que infrayace a conglomerado polimíctico conformado por abundantes clastos de caliza negra y escasa de riolita, riolita porfídica, andesita y pedernal negro. El espesor de esta unidad es de 400 m aproximadamente y estratigráficamente se encuentra cubriendo de manera discordante a la Formación Finlay.

Desde el punto de vista geohidrológico esta unidad es importante como zona de recarga debido a que presenta una moderada deformación frágil (fallas y fracturas) de rumbo noreste-suroeste y noroeste-sureste, en su mayor parte las fracturas se encuentran abiertas y comunicadas.

Basalto

Unidad ígnea extrusiva que forma derrames y en ocasiones algunas intrusiones fisurales. Sus afloramientos se ubican al este de la cuenca, principalmente sobre la Sierra Los Palmares, cerros El Sombreretillo y Prietos.

Litológicamente es un basalto negro con horblenda, olivino y plagioclasa, de estructura vesicular y amigdaloides. Las amígdalas están rellenas de calcita y sílice coloidal. Presenta estructura fluidal bien desarrollada y cubre discordantemente a tobas riolíticas del Oligoceno y en ocasiones es posible observar diques basálticos intrusionando la unidad riolítica.

Desde el punto de vista geohidrológico esta unidad presenta permeabilidad media, ya que su fracturamiento es intenso; sin embargo, parte de sus vesículas se encuentran rellenas por sílice coloidal y no se encuentran comunicadas entre sí.

Conglomerado Polimíctico

Alternancia de grava y arena poco consolidada. Se encuentra ampliamente distribuida, principalmente en ambos flancos de la Sierra Santo Domingo, partes bajas de la Mesa La Gloria, Sierra San Ignacio, flanco este de la Sierra El Cuervo, formando abanicos aluviales producto del intemperismo de las rocas preexistentes.

Está constituido por fragmentos líticos de caliza principalmente y en menor proporción de rocas volcánicas en las partes bajas de las sierras Santo Domingo y El Cuervo; mientras que el dominio de clastos volcánicos es mayor en La Mesa La Gloria, presenta diferentes grados de redondez de subangulosos a subredondeados.

Desde el punto de vista geohidrológico es la unidad granular más importante debido a que forma estructuras de abanicos aluviales donde desembocan los arroyos y puede ocurrir la recarga en tiempo de lluvias debido a la granulometría gruesa en las partes proximales, mientras que la recarga disminuye hacia donde la granulometría disminuye, es decir hacia las partes distales, donde se llegan a depositar limos y arcillas.

En conjunto las unidades sedimentarias pueden alcanzar espesores que varían entre 400 y 600 m, teniendo espesores considerables (hasta 300 m) de material arcilloso, lo cual genera fenómenos locales de semiconfinamiento.

Limo-arena

Depósitos derivados de la erosión de las rocas preexistentes, transportados por corrientes fluviales para ser acumulados hacia las zonas de planicies y valles; se encuentran ampliamente distribuidos hacia las partes centrales del acuífero. Arévalo (2005), asigna un espesor al material arcilloso hasta de 300 m.

Esta unidad se observa estratificada, semicompacta, formada por horizontes de limo, arena y grava; en la arena se observan granos de cuarzo, vidrio volcánico, escaso feldespató, hematita y abundantes líticos de riolita y andesita principalmente, la grava se encuentra constituida por fragmentos de roca volcánica de forma subredondeada y escasos fragmentos de caliza.

Desde el punto de vista geohidrológico esta unidad es impermeable debido al alto contenido de arcillas, por ello la recarga que proviene de la precipitación en el valle se considera difusa.

4.2 Geología estructural

En el acuífero se presenta un ejemplo claro en relación al control geológico-estructural y el aporte de agua subterránea, caso particular las minas Santo Domingo y San Antonio. Existe un sistema de fallas de rumbo noreste 20° y dos estructuras principales; la fallas Oriente y Poniente, las cuales son fallas normales que aportan el agua en el interior de la mina. Asociadas a estas estructuras existen fallas de rumbo noroeste 30° que aportan caudales a la fallas $N20^\circ E$. Otro de los aspectos que se debe considerar como parte de la geología estructural es la presencia de los manantiales que se tienen en el poblado de San Diego de Alcalá cuyo origen se asocia a la existencia de flujos regionales.

La deformación dúctil-frágil está representada por pliegues formados por el evento compresivo Laramide, con una orientación general noroeste-sureste. Entre los de mayor importancia se encuentran los anticlinales La Nopalera (fuera del área), Santo Domingo, San Ignacio y San Diego.

La deformación frágil es la que mejor se encuentra representada en el área, con tres sistemas de fallamiento principales, el primero es de orientación NW $30-55^\circ$ SE y generalmente desplaza al sistema NE-SW, el segundo sistema NE $12^\circ-80^\circ$ SW, generalmente son fallas de menores dimensiones y un sistema de fallas normales de menor abundancia N-S.

Existe otro fracturamiento de rumbo noreste-suroeste, el cual corta a ambos fracturamientos (Sierra Santo Domingo) y comunica a todo el fracturamiento en la porción oeste del anticlinal, sin dejar de mencionar que aparte del fracturamiento existen zonas de karsticidad que comunican hidráulicamente al acuífero con un rumbo preferencial dado por las fracturas de rumbo noroeste – sureste.

Anticlinal La Nopalera

Se localiza en el sector noreste (sierra El Cuervo), al este del rancho La Nopalera. Tiene una longitud de 8 km, con una orientación NW-SE en su porción sur, mientras que, hacia su extremo norte tiene una flexión con rumbo N-S, buza hacia el norte, es amplio (> 6 km) y asimétrico.

Su núcleo se compone de metalutita y metarenisca de la Formación Rara, sus flancos están formados por rocas cretácicas de la Formación Vigas, La Virgen, La Peña y Finlay.

Anticlinal Santo Domingo

La sierra de Santo Domingo se considera una estructura anticlinal asimétrica muy suave con un rumbo del eje anticlinal de 5° a 7° al norte y un buzamiento promedio de 7° al este y 8-10° al oeste. El anticlinal se encuentra muy dislocado por fallas normales y laterales del evento tectónico de Cuencas y Sierras con rumbos preferenciales de NW-SE, NE-SW, E-W y N-S. Las rocas aflorantes tanto dentro como fuera de la estructura corresponden a rocas de la Formación Finlay.

Anticlinal San Ignacio

Se localiza en la sierra San Ignacio, presenta una orientación NW-SE y una longitud de 3.5 km, consiste de un anticlinal simétrico, se interpreta como resultado de la orogenia Laramide, está formado en la Formación Finlay.

Anticlinal San Diego

Esta estructura se localiza en la sierra de San Diego. El anticlinal corresponde a una estructura volcada al suroeste, afectando a las formaciones Loma de Plata, Del Río y Buda. Tiene una longitud de 6 km y se encuentra orientado al noroeste.

La deformación frágil está representada por grandes fallas normales y laterales afectando principalmente a rocas volcánicas del Terciario y del Cretácico. Dentro del área del acuífero se reconocieron 3 sistemas estructurales:

Sistema NW-SE. Se interpreta como el más antiguo, ya que se encuentra desplazado por los sistemas de orientación NW-SE y N-S, consiste de fallas normales cuyo plano de falla varía de N 25° a 50° W con echados al SW y NE y longitudes de 1.3 km a 8.5 km.

Sistema NE-SW. En el campo oriente de la sierra San Antonio, las fallas de este sistema actuaron como controles tanto del emplazamiento de intrusivos premineralizantes como de la mineralización misma. En el campo poniente a profundidad, los mantos en las zonas de sulfuros y óxidos están fuertemente controlados por fallas y fracturas pertenecientes a este sistema (Salas G. P. et al., 1988). Con este sistema de fallas se formó la fosa tectónica de San Antonio y La Central.

Sistema N-S. En el campo poniente se considera el principal control estructural, está formado por fallas laterales y normales, con echado preferentemente al oriente, escaso desplazamiento vertical y variable continuidad tanto a rumbo como a profundidad, en los trabajos de minería subterránea se comprueba que los mayores cuerpos minerales están asociados a fallas pertenecientes a este sistema, conocidas como Chorro, Potosí, J-Norte, Peñoles, Tiro Alto y Bustillos. En la intersección con el sistema NE-SW prepararon el terreno para el emplazamiento de fluidos mineralizantes que formaron depósitos de notables dimensiones (Salas G. P. *et al.*, 1988).

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la información geológica, pruebas de bombeo y algunos cortes litológicos de pozos construidos en el área y obtenidos de los trabajos previos, se puede concluir que el acuífero se encuentra alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de arenas intercaladas con limos y arcillas, con espesores que van de 30 a 600 m, depositados sobre una secuencia volcanoclástica (riolitas, tobas, piroclastos). Cabe mencionar que la explotación de aguas subterráneas se realiza principalmente en los depósitos de sedimentos continentales recientes.

En el valle existe material arcilloso que reduce considerablemente el caudal que aportan los pozos.

Arévalo (2005), asigna un espesor al material arcilloso hasta de 300 m. Con el propósito de tener un panorama general de la geología del subsuelo, a continuación, se describe un corte litológico del Pozo Bachimba 1, ubicado a 8 km del poblado Lázaro Cárdenas, en el municipio de Rosales, en porción norte del acuífero, cuyas coordenadas (UTM) son 436389 y 3148520.

Las rocas más jóvenes perforadas por este pozo paramétrico son de origen lacustre con un espesor de 450 m, las cuales sobreyacen a rocas ígneas extrusivas de 1,825 m de espesor; estas a su vez sobreyacen a un conglomerado calcáreo de 101 m de espesor. Estos conjuntos de rocas se incluyeron en el Cenozoico Continental Indiferenciado con un espesor total de 2,376 m y descansan sobre rocas sedimentarias marinas de facies de plataforma y mar abierto con un espesor de 1,527 m. La sección hidrogeológica A-A' (figura 3) muestra, de manera general, la geometría del sistema acuífero, se trata de un valle cubierto por sedimentos recientes (aluvión) y material conglomerático con permeabilidad media a alta.

Se encuentra flanqueado al oriente y poniente por material volcánico cuya permeabilidad varía de media a alta. Aflorando al poniente y subyaciendo al material volcánico, se encuentran calizas terciarias intercaladas con lutitas.

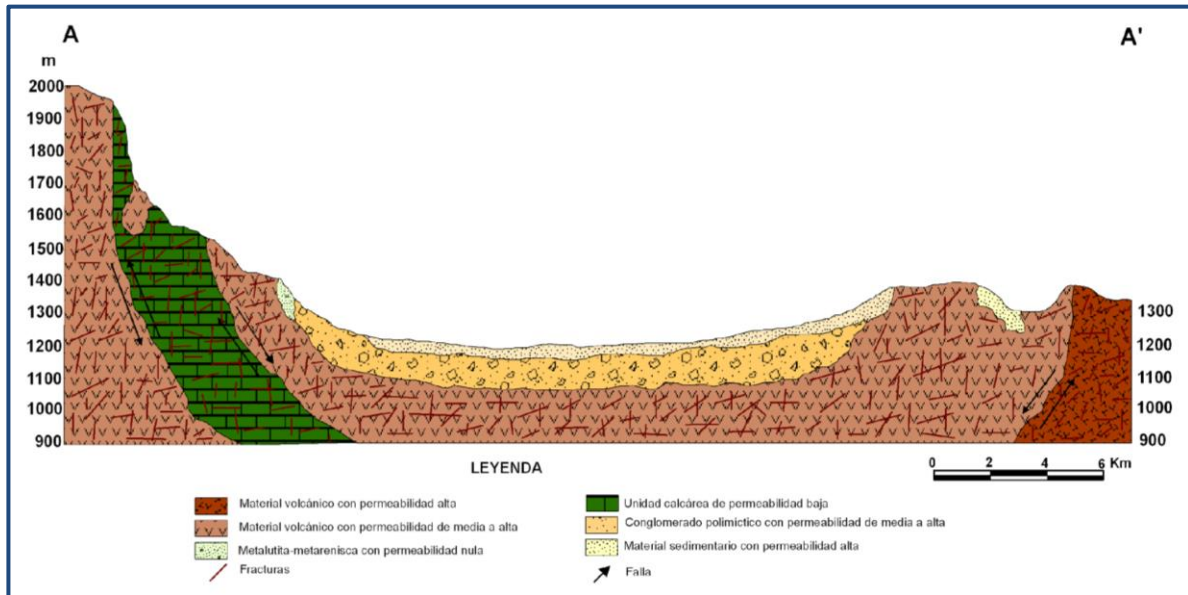


Figura 3. Sección Hidrogeológica A-A'

El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por rocas vulcanoclásticas, cuando no presentan permeabilidad secundaria, y por la secuencia metasedimentaria de la Formación Rara, cuyos afloramientos se presentan en la base de la Sierra El Cuervo, ubicada al noroeste de Ciudad Aldama.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de tipo **libre**, presenta una permeabilidad que varía de media a baja y se aloja en sedimentos aluviales depositados en el centro del valle, constituidos por arenas intercaladas con arcillas y limos estratificados, cuyo espesor puede alcanzar los 800 m.

La fuente principal de recarga es el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas, una menor fuente de recarga está representada por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle y en menor proporción por los retornos de riego agrícola.

5.2 Parámetros Hidráulicos

De acuerdo con la interpretación de 6 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en su etapa de abatimiento como recuperación, los valores de transmisividad obtenidos varían de 1.62×10^{-7} m²/s a 0.038 m²/s (14 m²/día a 3,196 m²/día); en tanto que para la conductividad hidráulica se reportan valores que oscilan entre 5.9×10^{-7} m/s a 9.46 m/s (0.050 y 8.00 m/día). Los valores más altos de estos parámetros hidráulicos se registran en los aprovechamientos ubicados cerca del río Chuvíscar.

En promedio se obtuvo una transmisividad de **0.01 m²/s** (840 m²/día) y una conductividad hidráulica de **2.33×10^{-5} m/s** (1.97 m/día).

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 1971 y 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En 1971 las profundidades variaban entre 10 y 80 m, valores máximos se ubican al este de la Sierra Santo Domingo y valores mínimos en la Sierra San Isidro, en el resto del valle la profundidad al nivel estático fluctuaba entre 10 y 30 m. Al igual que en la actualidad, las profundidades del agua tendían a disminuir hacia la parte central del valle y al sureste del acuífero, en las márgenes del río Chuvíscar.

En 2007 la profundidad era variable, desde niveles someros entre 10 y 20 m sobre los márgenes del río Chuvíscar, hasta niveles mayores a 90 m en la parte centro occidental del acuífero (figura 3).

Niveles intermedios entre 30 y 50 m se observan en el extremo sur del área, mientras que el único cono de abatimiento de dimensiones considerables se localiza en el extremo norte del acuífero, se trata de un cono compartido entre los acuíferos Aldama-San Diego y Laguna de Hormigas, cuyas profundidades son mayores a 100 m.

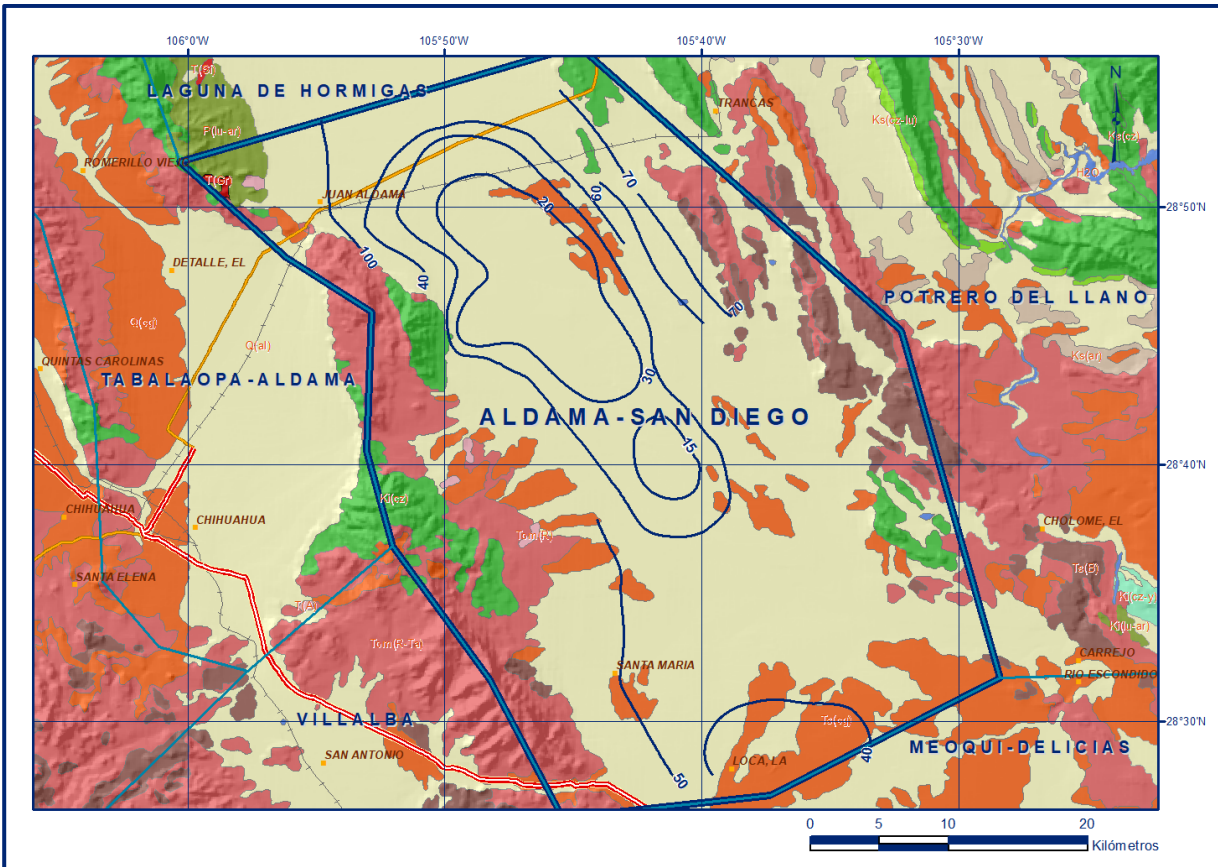


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2007 (Figura 4) evidencia flujos subterráneos que ingresan al acuífero por el extremo occidental, en donde se presentan valores entre 1,200 y 1,230 msnm.

En la parte norte del acuífero donde se presenta una segunda zona de recarga, los valores fluctúan entre 1,240 y 1,220 msnm.

Las equipotenciales muestran un comportamiento paralelo a la dirección del escurrimiento del río Chuvíscar, manifestando de esta manera que las alimentaciones provienen de las sierras que delimitan el valle.

El cono de abatimiento ubicado al norte del acuífero no ha alterado la dirección preferencial del flujo subterráneo.

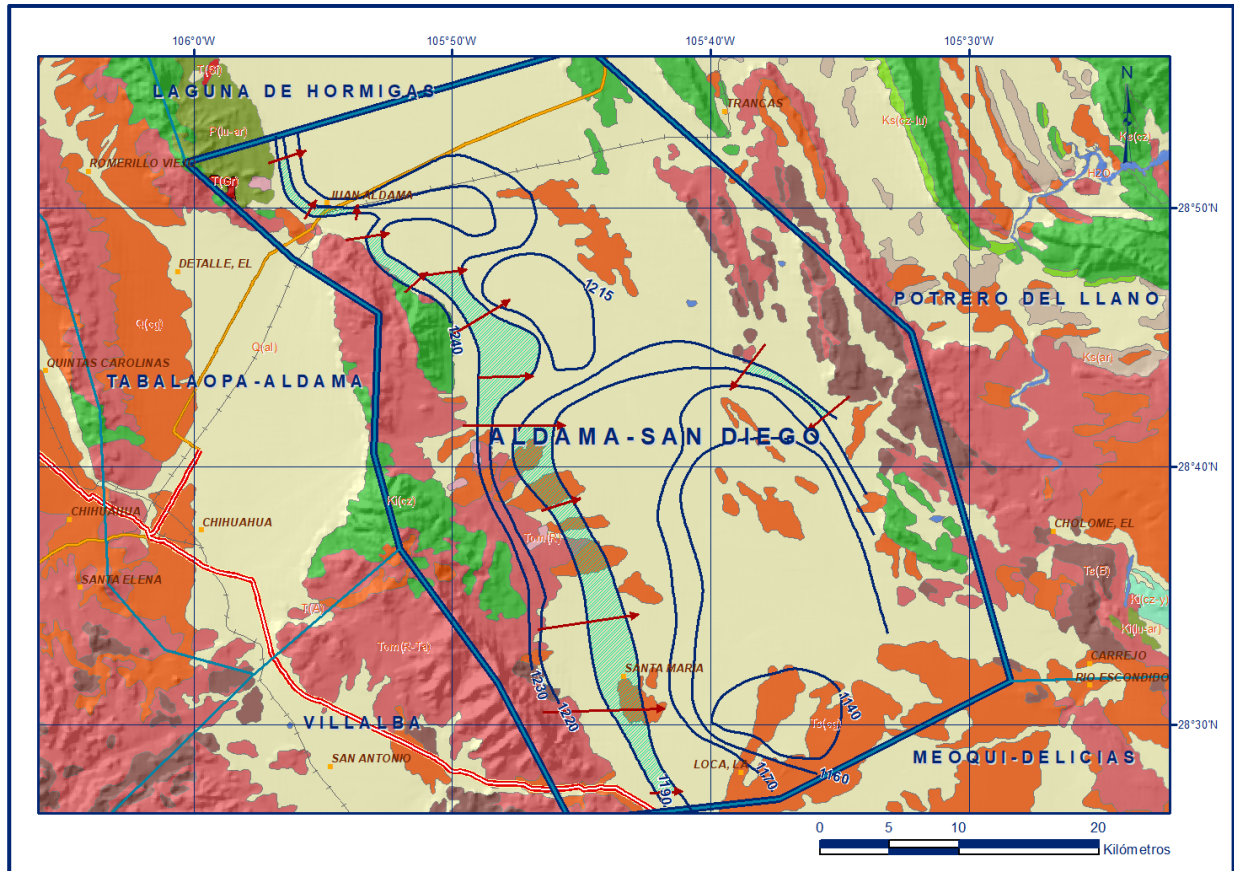


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Tomando en cuenta la información disponible para 1971 y 2007 se estimó un abatimiento promedio de 7.5 m en 36 años, lo cual implica un descenso de niveles de 0.2 m/año. En este periodo de tiempo los niveles piezométricos han evolucionado de una manera distinta, al sur han descendido hasta 30 m (0.8 m anuales), la zona centro norte registra descensos de 20 m (0.5 m anuales) y en la porción norte del acuífero existen recuperaciones positivas de hasta 5 m (0.13 m anuales), como se muestra en la figura 5.

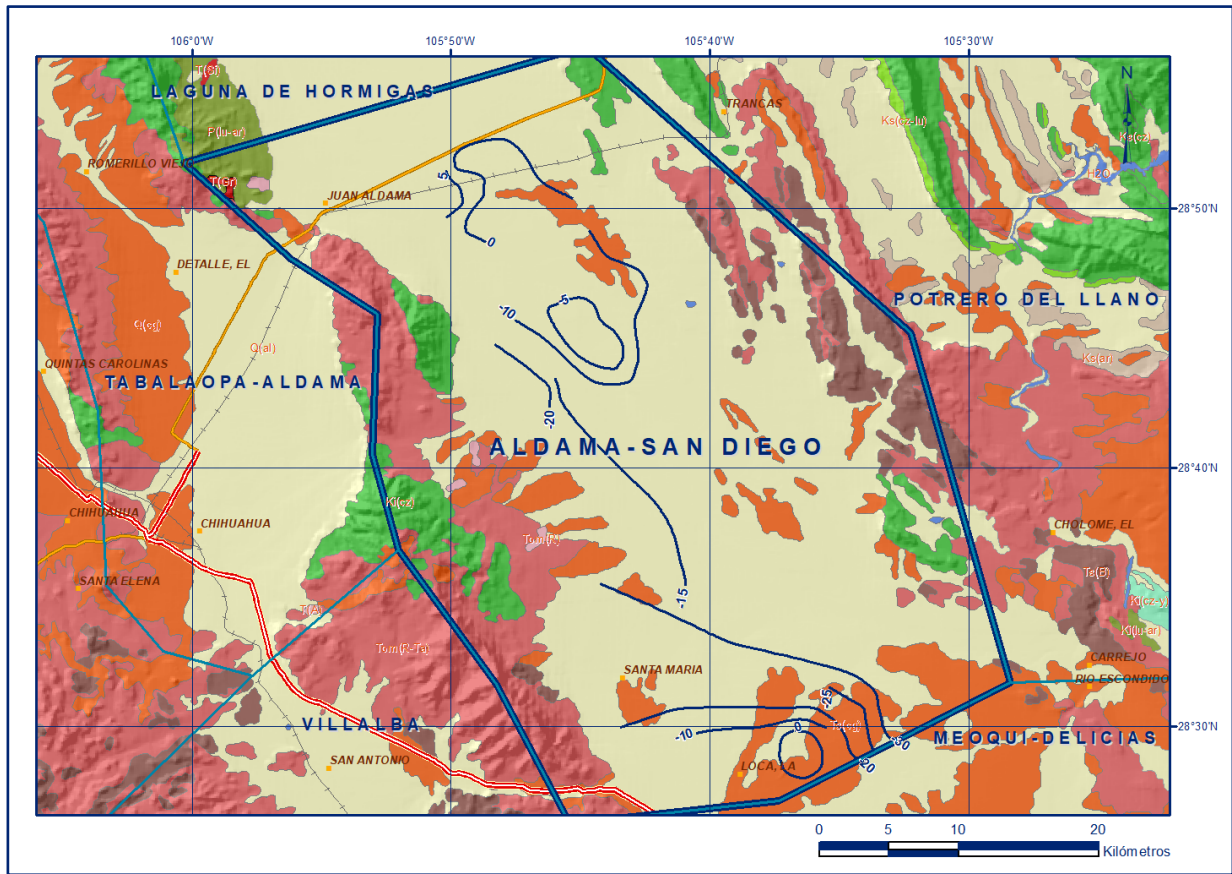


Figura 5. Evolución del nivel estático (1971-2007)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua

La información hidrogeoquímica en el acuífero no es reciente, pero se infiere que el agua es de buena calidad, debido a que los gradientes hidráulicos favorecen su rápida circulación desde las zonas de recarga. Esto hace que los tiempos de residencia sean cortos y el agua de reciente infiltración contenga un bajo contenido de sólidos totales disueltos. Sin embargo, a nivel regional existen antecedentes de la presencia de flúor y arsénico.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Para 2007, se tiene un total de 212 aprovechamientos, de los cuales 171 son pozos, 39 norias y 2 manantiales.

Del total de aprovechamientos, 132 (62.5 %) se destinan al uso agrícola, 45 (21.1 %) a usos múltiples, 20 (9.27 %) a uso doméstico y 15 (7.2 %) a varios usos.

El volumen de extracción total es de 63.6 hm³ anuales, de los cuales 56.4 hm³ (88.7 %) son para uso agrícola, 4.1 hm³ (6.5 %) para usos múltiples, 2.0 hm³ (3.1 %) para público urbano, 0.8 hm³ (1.2 %) para uso doméstico y el resto para otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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.

El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 1,403 km², que corresponde a la zona donde se localizan gran parte de los aprovechamientos de agua subterránea. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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 de un acuífero:

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

Para este caso particular, dadas las pocas variaciones en niveles estáticos con respecto al tiempo, fue considerado un cambio de almacenamiento nulo, por lo cual se optó por calcular la recarga natural considerándola como incógnita de la ecuación de balance.

De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente

$$\mathbf{R_v + E_h + R_i - B - D_m = \pm \Delta V(S)} \quad \mathbf{(I)}$$

Dónde:

R_v: Recarga vertical

E_h: Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_i: Recarga inducida

B: Bombeo

D_m: Descargas por manantiales

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

Representa la sumatoria de entradas de agua al sistema acuífero, ya sean naturales o inducidas. Para este caso las entradas están integradas por la recarga natural y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, ya que es esta región no existen centros de población importantes, que estén ocasionando fugas en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (R_v) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga Vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) fue estimado a partir de la sobreposición de configuraciones del nivel estático, a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy, el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión:

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Recarga por retornos de riego (R_r)

La recarga inducida por retorno de riego agrícola se determinó en función del volumen que se extrae del acuífero para uso agrícola, de manera general un 20% de este volumen retorna al sistema acuífero en forma de recarga inducida.

De acuerdo a la hidrometría estimada 56.4 hm³/año son para uso agrícola, por lo cual se consideró que se infiltran **11.3 hm³/año**.

7.1.4 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 4). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Dónde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

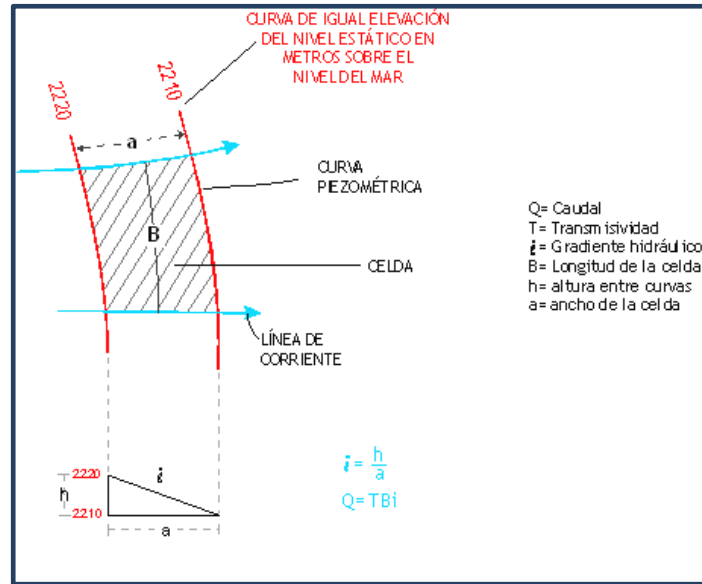
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Dónde:

T = Transmisividad en m^2/s

B= Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m



El volumen estimado como entradas horizontales es de **45.4 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2007)

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	4190	705	10	0.01418	0.0033	0.1961	6.2
E2	2761	614	10	0.01629	0.0033	0.1484	4.7
E3	4450	1001	10	0.00999	0.0033	0.1467	4.6
E4	4085	2167	10	0.00461	0.0033	0.0622	2.0
E5	5235	2817	10	0.00355	0.0033	0.0613	1.9
E6	3939	1960	10	0.00510	0.0033	0.0663	2.1
E7	6133	2006	10	0.00499	0.0033	0.1009	3.2
E8	8704	2113	10	0.00473	0.0033	0.1359	4.3
E9	6629	2388	10	0.00419	0.0033	0.0916	2.9
E10	6577	1766	10	0.00566	0.0033	0.1229	3.9
E11	5970	644	10	0.01553	0.0033	0.3059	9.6
TOTAL							45.4

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por el bombeo (B) y descarga por manantiales (Dm). No existen salidas horizontales (Sh), ni evapotranspiración (ETR), debido a que en el acuífero las zonas en las que se registra un valor de profundidad al nivel estático menor a los 10 m, se restringen a pequeñas áreas puntuales localizadas a lo largo del cauce del río Chuvíscar.

7.2.1 Descargas por manantiales (Dm)

En la zona no existen corrientes permanentes, por lo cual la descarga natural queda limitada a la presencia de manantiales, principalmente los conocidos con los nombres San Diego de Alcalá y en el Bosque de Aldama, los cuales tiene un caudal de **1.5 hm³/año**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **63.6 hm³/año**.

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

Para la determinación de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero registrada en el intervalo de tiempo que comprende de 1971 y 2007 (Figura 5). Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático, se estimó el cambio de almacenamiento en dos porciones del acuífero, una en la zona centro norte y otra en el extremo sur.

Se estimó un volumen de 93.4 hm³ para 36 años, considerando un coeficiente de almacenamiento de 0.07 se obtiene un cambio de almacenamiento negativo de 2.6 hm³/año (tabla 3). Por lo tanto **$\Delta V(S) = -2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$** .

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento para el periodo 1971-2007.

Abatimiento promedio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
2.5	5.3	0.07	0.9
-15.0	12.0	0.07	-12.6
-7.5	8.0	0.07	-4.2
-2.5	5.0	0.07	-0.9
-25.0	6.0	0.07	-10.5
-15.0	63.0	0.07	-66.2
		TOTAL	-93.5
	Promedio anual		-2.6

Solución a la ecuación de balance

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

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 63.6 + 1.5 - 2.6 - 45.4 - 11.3$$

$$R_v = 5.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 5.8 + 45.4 + 11.3$$

$$R = 62.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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. Para este caso, su valor es de **62.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes.

En este caso la descarga natural comprometida está representada por la descarga de manantiales, la cual es de **1.5 hm³/año**.

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 **120,243,522 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a **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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 62.5 - 1.5 - 120.243522 \\ \text{DMA} &= -59.243522\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **59,243,522 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recurso Hidráulicos, 1971. Estudio Hidrogeológico de los acuíferos de la zona de veda en la región de Aldama, Chihuahua”. Ariel Construcciones S.A.,