



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL
ACUÍFERO LAGUNA DE PALOMAS (0848), 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
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía	11
4.2 Geología Estructural	19
4.3 Geología del Subsuelo	21
5. HIDROGEOLOGÍA	22
5.1 Tipo de Acuífero.....	22
5.2 Parámetros hidráulicos.....	22
5.3 Piezometría	22
5.4 Comportamiento hidráulico.....	23
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	23
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	24
5.4.3 Evolución del nivel estático	25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	25
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	25
7.1. Entradas.....	26
7.1.1 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	26
7.1.2 Recarga vertical por lluvia (Rv)	27
7.1.3 Retornos de Riego (Rr).....	28
7.2 Salidas	28
7.2.1 Bombeo (B).....	28
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	29
8. DISPONIBILIDAD	29
8.1 Recarga total media anual (R).....	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	31

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Laguna de Palomas, definido con la clave 0848 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el límite suroriental del estado de Chihuahua, cubre una superficie aproximada de 1 652 km². Geográficamente, la zona se encuentra ubicada entre los paralelos 26°45'16" y 27°17'40" de latitud Norte y entre los meridianos 103°46'39" y 104°14'26" de longitud Oeste (Figura 1).

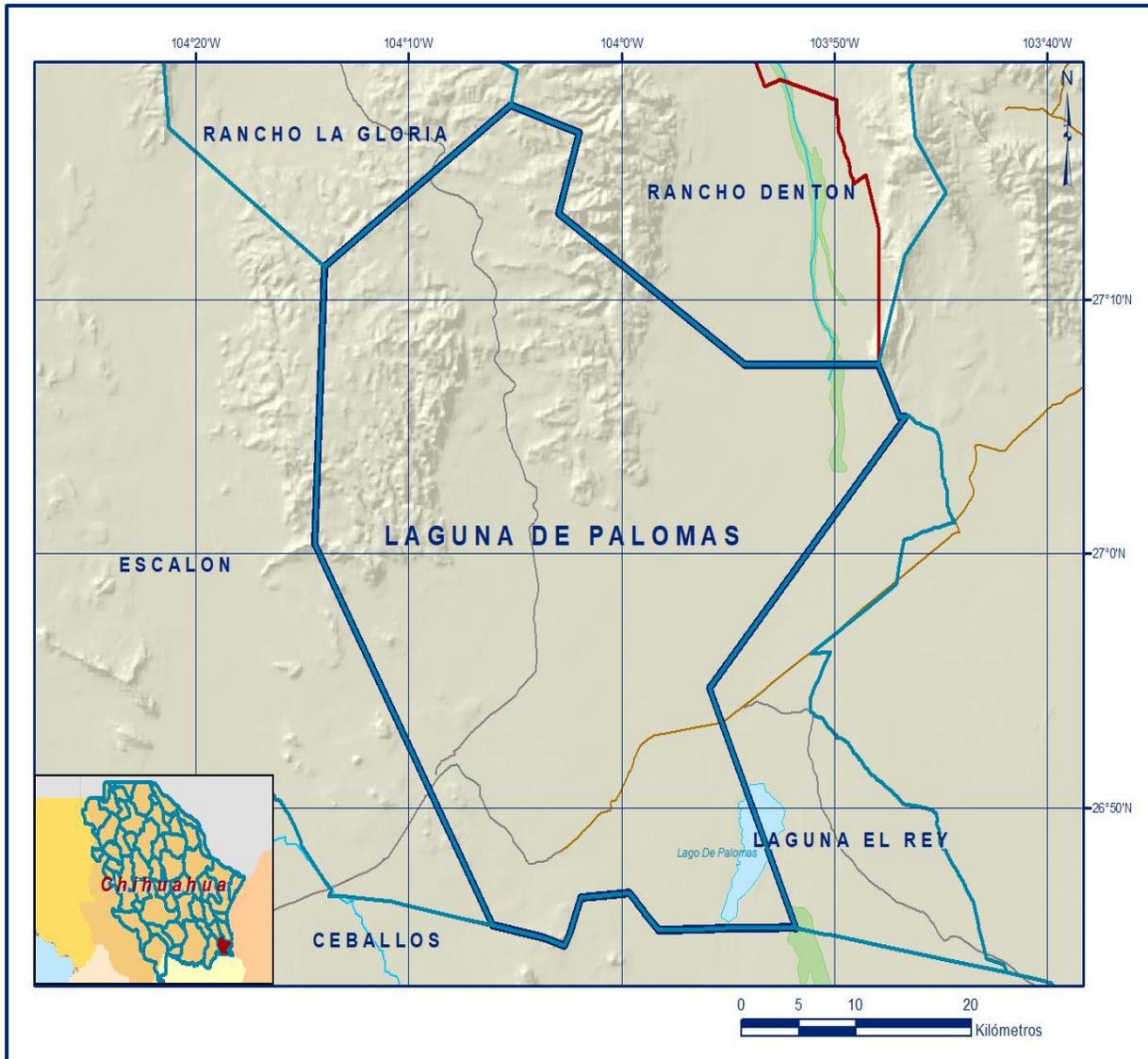


Figura 1. Localización del acuífero Laguna de Palomas

Limita al norte con los acuíferos Rancho Dentón y Rancho La Gloria, al oeste con el acuífero Escalón, al este con Laguna El Rey, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua. Al sur con el acuífero Ceballos en el estado de Durango.

Geopolíticamente se ubica completamente dentro del municipio Jiménez, estado de Chihuahua.

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

ACUIFERO 0848 LAGUNA DE PALOMAS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	14	26.4	27	0	24.5	
2	104	13	58.0	27	11	19.3	
3	104	5	12.4	27	17	39.7	
4	104	1	59.8	27	16	33.9	
5	104	2	57.6	27	13	24.1	
6	103	54	13.2	27	7	26.2	
7	103	47	57.3	27	7	26.6	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	103	46	39.8	27	5	24.5	
9	103	55	53.3	26	54	42.1	
10	103	51	48.3	26	45	16.5	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	104	6	4.6	26	45	22.3	
1	104	14	26.4	27	0	24.5	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Laguna de Palomas pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. El territorio del acuífero se encuentra totalmente vedado; en la mayor parte del acuífero en su porción norte se encuentra sujeto a las disposiciones del *Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Región Lagunera*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 17 de abril de 1965, esta veda se clasifica como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. La porción sur del acuífero se rige por lo dispuesto en el *Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Ceballos y de La Laguna, que comprenden parte de los Estados de Chihuahua, Durango y Coahuila* publicado en el DOF el 6 de diciembre de 1958, 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 3.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito de riego, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación.

En algunos acuíferos vecinos se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: LAGUNA DE PALOMAS, LLANO DE GIGANTES, LAS PAMPAS, RANCHO EL ASTILLERO, LAGUNA DE JACO, RANCHO LA GLORIA, RANCHO DENTON, LAGUNA LOS ALAZANES, LAGUNA DEL REY, VALLE DEL PESO, FLORES MAGON-VILLA AHUMADA, EL SABINAL Y LOS JUNCOS, ESTADO DE CHIHUAHUA, realizado por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) para la Comisión Nacional del Agua en 2010. El objetivo general de este estudio fue determinar las condiciones geohidrológicas de los acuíferos para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, en algunos de ellos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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

El acuífero Laguna de Palomas se encuentra en la provincia Sierras y Llanuras del Norte y dentro de esa provincia se encuentra en las subprovincias del Bolsón de Mapimí y en la subprovincia Llanuras y Sierras Volcánicas.

La subprovincia Bolsón de Mapimí está comprendida en territorio mexicano, se extiende desde su frontera septentrional con la subprovincia Llanuras y Médanos del Norte, hacia el sur pegada al costado oriente de la Sierra Madre Occidental, para ampliarse al este hasta la zona de la laguna El Rey y las poblaciones Mapimí, Nazas y este de Torreón, de tal forma que abarca parte de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango.

Dominan las llanuras aluviales y las bajadas, pero hay pequeñas sierras escarpadas y plegadas, así como lomeríos escarpados y ramificados, orientados norte-sur. Los lomeríos en la parte boreal están relacionados con rocas volcánicas ácidas mostrando fallas normales sobre sus costados; y en la austral, con calizas.

La subprovincia Sierras y Llanuras Volcánicas en territorio mexicano comprende parte de los estados de Chihuahua y Coahuila; al norte se extiende hacia los Estados Unidos de América.

Se localiza en el costado oriente de la entidad, a manera de una franja orientada norte sur que va del noroeste de Ojinaga y el límite boreal con Coahuila, al sur de la sierra Las Pampas y el oriente de la sierra El Diablo.

3.2 Clima

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la mayor parte del acuífero domina dentro del tipo Muy seco, el subclima Muy seco semicálido, dentro del clima Seco, el subclima Seco templado y por último dentro del clima de los Semisecos el subclima semiseco templado.

Las características principales de los climas Muy seco son que la evaporación excede a la precipitación, además son los más secos del grupo, su baja humedad depende principalmente de la escasa precipitación y la temperatura, pero también influye la poca persistencia y lo torrencial de la lluvia, la naturaleza del suelo y la cubierta vegetal; están clasificados como muy extremosos, por su oscilación térmica media anual mayor de 14 °C.

El subclima Muy seco semicálido se caracteriza por presentar temperaturas medias anuales mayores de 18 °C, temperaturas medias del mes más frío inferiores a 18 °C y precipitaciones totales anuales entre 200 y 400 mm.

El tipo Seco son intermedios en cuanto a humedad respecto a los Muy secos y los Semisecos y están considerados como de transición entre estos dos, se distribuyen en forma de una franja que atraviesa el estado en sentido noroeste-sureste sobre los terrenos colindantes de la provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte con la Sierra Madre Occidental, pero también se producen en las sierras dispersas en la primera provincia citada.

Los climas Semisecos también forman parte del grupo de climas secos, en ellos la evaporación excede a la precipitación, pero en menor grado que en los muy secos y secos; están considerados como de transición entre los climas secos del grupo al que pertenecen y los climas subhúmedos de los grupos cálido y templado. Con base en su temperatura media anual y su régimen de precipitación están clasificados en: semiseco templado con lluvias en verano, semiseco semicálido con lluvias en verano, semiseco semifrío con lluvias en verano y semiseco cálido con lluvias en verano. Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de la estación climatológica Escalón que tienen influencia en el área del acuífero, cuenta un con periodo de análisis de 1957 a 2003. Con estos datos, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **324.45 mm y 18.36 °C** respectivamente.

Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1821.46 mm anuales**, según datos de la misma estación climatológica con periodo de análisis de 1996 a 2006.

3.3 Hidrografía

El acuífero Laguna De Palomas se encuentra dentro de la Región Hidrológica de Mapimí, parte de esta región hidrológica está al este-sureste del estado y pertenece a la vertiente interior, es decir, no cuenta con salida al mar. Representa 10.63% del territorio chihuahuense, dentro del cual se tienen cuatro cuencas de las seis existentes en la región.

Cabe destacar, que no existen, en esta porción de la región hidrológica, escurrimientos de gran magnitud y las corrientes que se generan son arroyos intermitentes de trayectorias cortas, algunos de los cuales llegan a descargar en depresiones topográficas donde forman lagunas intermitentes.

Debido a las características descritas, propiciadas por la escasa precipitación, en esta región no se conocen los montos de escurrimiento, ya que en ellos no han operado estaciones hidrométricas. Dentro de la región hidrológica de Mapimí el acuífero se encuentra en la cuenca hidrológica de Arroyo La India-Laguna Palomas la cual de localiza hacia el extremo sureste del estado, comprende 2.58% de su territorio; la superficie de esta cuenca es compartida entre los estados de Durango, Coahuila y Chihuahua; en este último, limita al norte con la cuenca El Llano-Laguna El Milagro (E) de la RH-35; al oeste con la cuenca Río Florido (M) de la RH-24; al oriente se interna hacia Coahuila; y al sur penetra a Durango.

3.4 Geomorfología

La interacción de las fuerzas endógenas y exógenas, se encuentran en cada una de las geoformas y son responsables del paisaje que se observa.

De tal forma que la primera de ellas dio origen a formas plicativas como en las sierras: Las Pampas, Chupaderos, Barraza, Camargo, Mezcalera y Savonarola; formas plegadas y afalladas están presentes en las sierras La Venada, El Diablo y sierras circundantes al valle de Zaragoza; en estructuras plicativas con posterior intrusión de magma, fueron modeladas formas cóncavas como en las sierras Naica, La Perla, Almoloya y Cerro de los Reyes.

La intrusión de cuerpos hipabisales formaron una serie de diques en los cerros La Tinaja y La Varita; efusiones volcánicas de tipo básico originaron conos volcánicos y derrames de gran extensión con fase de malpaís (Cerro El Rosario y prominencia en las áreas de Búfalo y Santa Gertrudis); con desarrollo de conos secundarios (Cerro La Cosquillosa y Cerro El Venado). Material ígneo de tipo explosivo y/o lavas de composición básica se manifiestan en forma de mesas: Mesa La Canoa, Mesa Buenavista, y Mesa Las Golondrinas, algunas de estas geoformas se encuentran basculadas (Sierra Agua de Mayo y Sierra Agua Chile); efusiones ácidas a partir de un conducto volcánico han formado cuellos volcánicos (prominencias del poblado La Cruz). Fuerzas distensivas dieron pie a la formación de cuencas tectónicas que posteriormente fueron rellenadas, creando una de las unidades representativas del área y a la que se le denomina bolsón. Preponderantemente el proceso de destrucción de las estructuras antes mencionadas, lo constituye la disección causada por las corrientes fluviales, las cuales al labrar su cauce han formado barrancas y cañones así como la construcción de llanuras y valles aluviales.

En general y de acuerdo a su génesis las corrientes del área son consecuentes radiales centrífugas como las desarrolladas en las unidades volcánicas, consecuentes deformativas las que drenan hacia los bordes de las sierras plegadas, aquellas que drenan en las estructuras sinclinales son las consecuentes longitudinales; recientes como las que fluyen en la porción oriental de la Sierra El Diablo, se han formado corrientes subsecuentes a causa del fracturamiento presente en la Sierra La Mezcalera; en la porción sur de la Sierra El Diablo se han desarrollado una serie de avenamientos que no guardan una relación estructural por lo tanto se les agrupa como insecuentes.

De acuerdo con observaciones de campo la zona se encuentra en una etapa de madurez; aunque en las zonas con presencia de material volcánico, la etapa de erosión es de juventud tardía.

4. GEOLOGÍA

El lapso de tiempo geológico representado por las unidades cartografiadas, comprende la parte superior del eratema Mesozoico hasta el Reciente. El Mesozoico está indicado por rocas sedimentarias depositadas en facies marinas y el sistema que se muestra principalmente es el Cretácico. Para este tiempo existía una serie de elementos paleo-geográficos y de actividad tectónica que se desarrollaron desde el triásico y dieron pie a la formación de dos facies de sedimentación identificadas para el Cretácico Inferior (Pacheco C., Castro R., Y Gómez Miguel, 1984). La primera de ellas de edad Hauteriviano-Turoniano según Juan Araujo y Rodolfo Arenas (1986), que se depositó al occidente del Mar Mexicano o Geosinclinal Mexicano, en facies de cuenca y con aportes de sedimentos terrígenos de probable origen de arco volcánico, representada por caliza, lutita y arenisca (Figura 2).

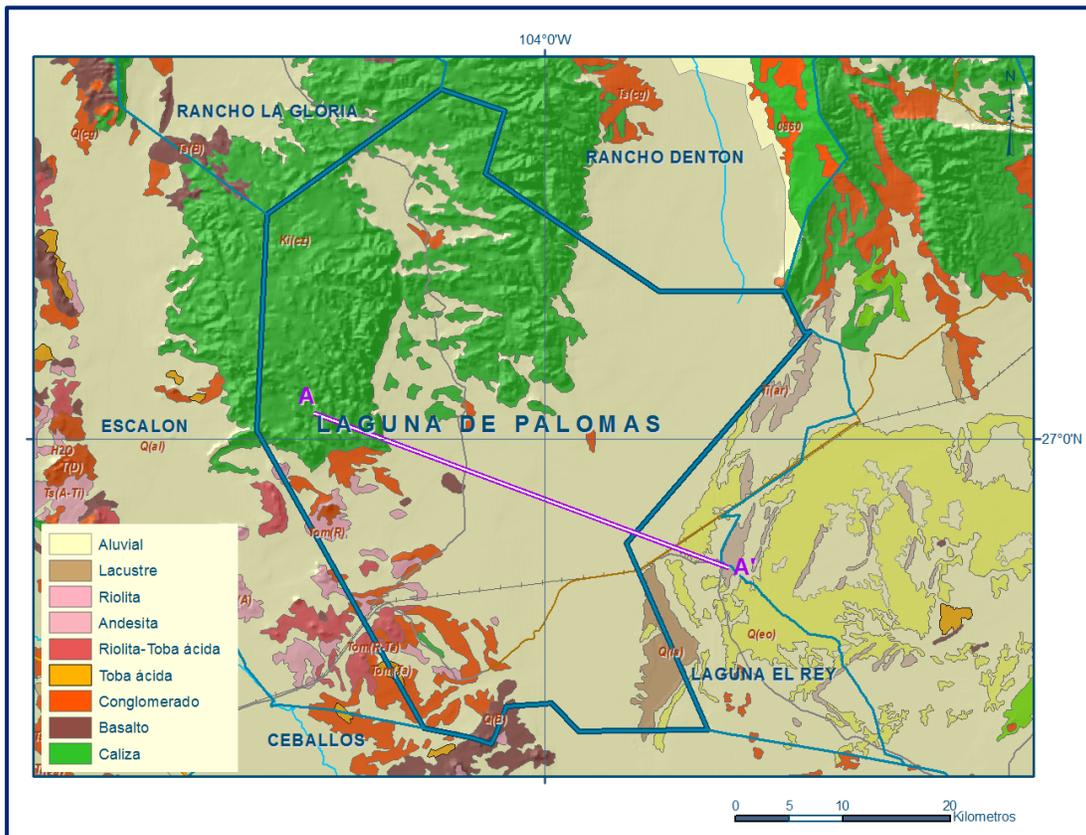


Figura 2. Geología superficial del acuífero

La segunda unidad, se deposita para este mismo tiempo al oriente, en donde prevalecían condiciones de facies litorales y de mares someros debido a la presencia de elementos positivos como la Isla del Cuervo e Isla de Coahuila, las que fueron transgredidas hasta el Albiano y predominar facies de plataforma de mar abierto con desarrollo de bancos arrecifales y condiciones lagunares en la Plataforma de Coahuila.

Para el Cretácico Superior (Cenomaniano-Turoniano), las condiciones de depósito varían a causa del levantamiento de la parte occidental y central (López Ramos, 1981) y dan lugar a la sedimentación marina con predominio de terrígenos en facies de mar abierto, iniciándose con la depositación de sedimentos calcáreo-arcillosos.

De acuerdo con Paz Flores (1984), Araujo M. y Arenas P. y las observaciones de campo, ambos prismas sedimentarios presentan cambios de facies hasta el Turoniano.

En el Senoniano prevalece el levantamiento occidental con el comienzo de la regresión marina hacia el oriente y cambios en las facies de sedimentación de mar abierto a litorales; por tal motivo el gran aporte de terrígenos originó una secuencia “flysh” representada por arenisca y lutita. Las relaciones estratigráficas entre las unidades Cretácicas son transicionales y concordantes.

La fase orogénica proveniente del occidente, continúa a principios del Cenozoico acompañada con la intrusión de granito, granodiorita, gabro y diorita (S.P.P. 1984), se notó que intrusionan a las calizas de plataforma.

Las rocas extrusivas de tipo andesítico y relacionadas con la primera fase volcánica que dio origen a la Sierra Madre Occidental, sobreyacen discordantemente a las rocas sedimentarias Cretácicas, que a su vez infrayacen discordantemente a tobas del Oligoceno-Mioceno y a rocas sedimentarias del Terciario Superior. Se observaron secuencias volcano-sedimentarias que infrayacen a las rocas denominadas por Mc Dowell y Clabaugh (1979) como “Complejo Volcánico Superior”.

La segunda fase volcánica la representan tobas de composición riódacítica y riolítica con intercalación de volcanoclásticos, así como riolita del Oligoceno Mioceno que en ocasiones extruyeron a través de fracturas; estas unidades sobreyacen en discordancia a las rocas del “Complejo Volcánico Inferior” Mc Dowell y Clabaugh.

Andesita post-miocénica sobreyace concordantemente a las unidades ácidas e infrayace a basalto, el cual es el representativo de las últimas manifestaciones volcánicas, de acuerdo con las observaciones de campo, esta unidad sobreyace también discordantemente a rocas ígneas, así como a unidades Cretácicas e infrayace a rocas y sedimentos del Pliocuaternario. Contemporánea y/o posteriormente a las manifestaciones volcánicas que dieron origen a la Sierra Madre Occidental, ocurre la depositación de sedimentos clásticos en facies continentales representados por areniscas y conglomerados, que rellenan antiguas cuencas continentales, sobreyacen en forma discordante a las rocas del Cretácico e infrayacen a rocas extrusivas volcánicas de tipo ácido e intermedio y a depósitos del terciario Superior. Para este mismo tiempo en el Valle de Zaragoza las condiciones iniciales fueron de relleno de cuenca formada por areniscas y conglomerados y posteriormente lacustres, evidenciados por la depositación de caliza continental, limolita y lutita, esta secuencia es discordante con las unidades cretácicas.

Para el Cuaternario se deposita material clástico no consolidado y el desarrollo de amplias planicies aluviales que rellenan los bolsones, también se deposita: travertino, caliche, sedimentos lacustres y localmente suelos eólicos.

4.1 Estratigrafía

Rocas Sedimentarias

CALIZA, Ki (cz). Aflora hacia la parte norte noroeste del área de estudio, conforma prácticamente en su totalidad a la sierra El Diablo con elevaciones arriba de los 2000 msnm. Está formada por caliza depositada en facies de plataforma de mar abierto, con desarrollo lagunar y arrecifal.

Megascópicamente su textura es de mudstone a wackestone, con variaciones locales a packstone, al microscopio las texturas son: micrita, biomicrita, espatita y en algunas muestras clástica samítica y clástica pelítica. En general la mineralogía de la unidad está representada por: calcita (micrita y espatita), trazas de sílice, trazas de hematita y feldespatos autógenos. Los tonos característicos son beige claro en muestra fresca, al intemperismo gris oscuro y gris claro.

La estratificación es variable, de 30 a 40 cm en caliza arcillosa, de 20 a 40 cm con intercalación de limolita arenosa y abundantes fósiles.

LUTITA-ARENISCA, Ki(lu-ar). Secuencia de lutitas calcáreas, areniscas y delgadas capas de caliza arcillosa, hacia su parte inferior presenta yeso que se explota comercialmente. Esta litología sugiere un depósito en aguas marinas someras inicialmente de salmueras. Los yesos se encuentran recristalizados por efecto de un cuerpo intrusivo que también es causante de mineralización hidrotermal, con sulfuros de cobre y hierro en esta unidad.

Esta secuencia está infrayaciendo a la unidad de calizas del cretácico inferior y se presenta en gran medida cubierta discordantemente por conglomerados terciarios, los cuales cubren por completo a los yesos. Por sus características litológicas y posición estratigráfica, esta unidad es equivalente a la formación Cuchillo (Burrows, 1910), que pertenece al Aptiano. Morfológicamente constituye parte de una ladera de sierra con perfil semicóncavo.

CALIZA-YESO, Ki (cz-y). Unidad constituida principalmente por calizas biógenas, por yeso y algunos horizontes de lutita depositada en un ambiente que varía de nerítico externo a epinerítico y lacustre. Las calizas varían en su coloración de gris claro a gris oscuro, y están dispuestas en estratos que varían de delgados a medianos, con horizontes delgados fosilíferos. Generalmente se observan estratos gruesos de yeso sacaroide color gris claro, de color amarillo claro al intemperismo, presenta cavidades por disolución y alterna con estratos medianos de areniscas de grano fino. Esta unidad no aflora.

CALIZA-LUTITA, Ki(Cz-Lu).

Unidad que consiste de una alternancia de lutitas calcáreas, margas y calizas en estratos delgados y escasamente gruesos; las margas y calizas de estratos delgados son de texturas micríticas y biomicríticas, lo cual indica un ambiente marino de borde de plataforma con predominante aporte de terrígenos y restringidos desarrollos arrecifales. No aflora en la zona del acuífero.

CALIZA-LUTITA, Ks (cz-lu). La descripción de esta unidad comprende a dos unidades que presentan características litológicas semejantes: Las Formaciones Del Río y Ojinaga que se encuentran separadas entre sí por una unidad constituida por calizas arrecifales: La formación Buda. Esta unidad no aflora.

CALIZA, Ks (cz). Unidad constituida por capas de caliza que fueron depositadas en un ambiente nerítico interno a medio.

La caliza es de tipo mudstone y grainstone de color gris claro, en estratos que van de medianos a gruesos, esta unidad corresponde a la formación Buda y sus contactos inferior y superior son nítidos y concordantes con la Formación Del Río y la Formación Ojinaga respectivamente, definidos claramente por los estratos de caliza compacta de la Formación Buda. Su edad Cenomaniano inferior está determinada por la amonita budaicera sp. y se correlaciona con la parte superior de la Formación Cuesta del Cura del estado de Coahuila. No aflora en la zona del acuífero.

CONGLOMERADO, Ks (Cg). Ortoconglomerado petromíctico de clastos de caliza sostenidos entre sí, muy bien consolidado y compactado con cementante calcáreo; los fragmentos están redondeados y subredondeados, por lo general bien clasificados uni y bimodales con diámetros promedio de 4 a 10 cm y/o de 40 a 30 cm; la caliza que constituye los clastos es de textura mudstone y packstone que incluye fragmentos de pelecípodos y nódulos de pedernal café y proviene de las unidades de caliza y lutita del cretácico inferior; este conglomerado presenta estratificación gruesa bien definida que se observa claramente plegada.

Localmente contiene mineralización hidrotermal de fluorita en pequeños cristales cúbicos, asociada al afloramiento de un pequeño dique no cartografiable de composición diorítica.

LUTITA-ARENISCA, Ks (lu-ar). Unidad constituida por lutita y arenisca, depositada en facies marinas litorales. Ocasionalmente se intercalan estratos conglomeráticos con clastos areno-redondeados de caliza y roca ígnea intrusiva, así como una capa de hierro sedimentario de 30 cm de espesor. No aflora en la zona del acuífero.

CONGLOMERADO, Ts (cg). Unidad constituida por un conglomerado polimíctico depositado en facies continentales, se le observa mal clasificados con clastos de 5 a 50 cm de diámetro, predominando los fragmentos de roca calcárea, en menor proporción fragmentos de rocas ígneas, su grado de redondez varía de subangulosos a subredondeados y dispuestos en forma caótica.

Se encuentran unidos por una matriz arcillosa de color café cementante calcáreo, ocasionalmente se presentan con fracturas rellenas de calcita, se observaron pliegues de gran radio de curvatura, pequeñas fallas locales y en discordancia angular con conglomerados Cuaternarios.

CONGLOMERADO, Q (cg). Depósitos conglomeráticos polimícticos depositados en facies continentales derivados principalmente de rocas ígneas y escasas rocas sedimentarias, los clastos varían en tamaño siendo estos desde arenas hasta guijarros y bloques, el grado de redondez de los fragmentos es anguloso y subanguloso mostrando escaso retrabajo, unidos por una matriz areno-arcillosa de color rojizo, también llegan a contener poco cementante calcáreo. En la base de estos conglomerados predominan los líticos pequeños desde unos milímetros a 5 centímetros y con horizontes arenosos de 10 cm aproximadamente con estratificación cruzada. En la parte superior los clastos son de diámetro entre 40 y 60 cm, estos se les aprecia imbricación con orientación noreste, el color de la unidad es gris claro que intemperiza a color café, generalmente estos conglomerados presentan muy poca compactación encontrándose la mayoría de las veces deleznable, cubren discordantemente a rocas sedimentarias Cretácicas y de la misma forma a la secuencia volcánica del Oligoceno-Mioceno, así como a rocas basálticas y conglomerados del Terciario Superior. Por posición estratigráfica y las características que se observaron, se le asigna una edad correspondiente al Cuaternario. Su morfología es de lomas de pendiente suave y ligeras ondulaciones situadas en las planicies.

EOLICO, Q (eo). Unidad formada por sedimentos eólicos recientes, depositados por la acción del viento. Su granulometría es arenosa, los fragmentos se encuentran bien redondeados y el tamaño de las partículas es homogéneo. Sus componentes son cuarzo, feldespato y fragmentos de roca, los estratos presentan estructura cruzada. Se expresa morfológicamente en forma de dunas.

LACUSTRE, Q (la). Depósitos de facies continentales lacustres que forman una secuencia alternante de arenas de grano fino, limo y arcilla, con estratos de 5 a 10 cm de espesor en la superficie se nota la presencia de sales, las cuales han formado una costra. Estos depósitos afloran en las depresiones que dan origen a zonas de inundación.

ALUVIAL, Q (al). Depósitos de origen fluvial derivados de la erosión y denudación de las rocas pre-existentes en el área, la acumulación de éstos representa el evento más joven del área y se encuentra rellenando extensos valles y fosas tectónicas, los materiales de relleno son arcillas, limos arenas y gravas, con un grado de redondez que varía de sub-redondeado a bien redondeado, en la que destacan grandes cantidades de granos de cuarzo, fragmentos de roca y feldespatos.

Localmente llega a presentar estratificación cruzada, así como la presencia de gradación y algunas estructuras lenticulares. Debido al acomodo de las partículas granulométricas su permeabilidad es alta, dando origen a la formación de acuíferos de tipo libre, los cuales son ampliamente explotados en la región por medio de pozos. Los espesores de estos depósitos son variables con expresión morfológica de extensas planicies que en ocasiones están disectadas por pequeños arroyuelos que desembocan en lagunas endorreicas.

Rocas Ígneas Extrusivas

TRAQUITA, T (Tq). Roca ígnea extrusiva, formada por sanidino y oligoclasa, como accesorios: apatito, esfena y cuarzo, su textura es merocristalina afanítica.

Presenta tono gris oscuro en muestra fresca y ocre al intemperismo, forma pseudo estratos y fracturas verticales, lo que ha originado prismas rectangulares de 1 a 2 metros. La unidad muestra un alto grado de meteorización que contrasta con las unidades adyacentes. Infrayace a rocas andesíticas del Terciario Superior, se correlaciona con las primeras manifestaciones volcánicas del Terciario Inferior, de acuerdo con C. Ragin, 1978 en S.P.P. 1984. Su morfología es de ladera.

RIODACITA-TOBA ACIDA, T (Rd-Ta). Unidad que incluye una alternancia de derrames de riodacita y tobas de composición riolítica, líticas cristalinas y soldadas dispuestas en una alternancia que muestra, en general, una pseudo estratificación, comúnmente inclinada al noroeste. Los derrames son de color gris con vivos blancos con textura holocristalina porfídica. Estas rocas están sobrepuestas localmente a conglomerados cretácicos y a aparatos andesíticos terciarios y se encuentra cubierta parcialmente por basaltos y conglomerados del Terciario.

RIOLITA, Tom (R). Roca ígnea extrusiva de quimismo ácido formado por cuarzo, sanidino y ortoclasa, como minerales accesorios biotita y circón, su textura es merocristalina porfídica y afanítica. En general la roca presenta tono gris claro en muestra y gris oscuro al intemperismo, estructura masiva fluidal, pseudo estratificación y fracturamiento vertical que favorece la formación de bloques de 1 a 3 metros de diámetro. Sobreyace a una secuencia sedimentaria del Cretácico e infrayace a rocas ígneas y sedimentarias del Terciario Superior. La unidad es correlacionable con el Complejo Volcánico Superior Mc Dowell y Clabaugh del Oligoceno-Mioceno. Su morfología es de cerros con laderas escarpadas.

RIOLITA-TOBA ACIDA, Tom (R-Ta). Unidad constituida por diversas rocas de composición ácida: tobas riolíticas, tobas riódacíticas.

En general la mineralogía de la unidad lo constituyen: microclina, sanidino, andesina, oligoclasa y cuarzo; como minerales accesorios: circón, hematita, biotita, piritita y fragmentos de roca. La textura en las rocas efusivas es mero cristalina porfídica y vitrofídica en las rocas explosivas; piroclástica y brechoide.

Son masivas, con estructura fluidal, intercalada con toba o inyectadas en planos verticales ondulantes, es decir perpendiculares a la pseudo estratificación con desarrollo de estructuras secundarias a partir de la segregación de sílice en cavidades preexistentes.

TOBA ACIDA, Tom (Ta). Unidad ígnea explosiva formada por: toba ácida, toba riolítica, toba riódacítica e ignimbrita; en general la mineralogía está representada por andesina, oligoclasa y cuarzo, unidos por una matriz vítrea, la textura es merocristalina piroclástica. Las rocas presentan en ocasiones intercalaciones de riolita y horizontes volcánico clásticos, cuyos fragmentos varían de 5 a 10 mm de diámetro, sub angulosos, unidos por una matriz tobácea y cementante silíceo, en ocasiones los fragmentos son de riolita y vidrio volcánico.

ANDESITA, Ts (A). Unidad ígnea efusiva formada por andesina y oligoclasa, unidas por una matriz microlítica de plagioclasas de la misma composición, se reportan minerales accesorios como: augita, apatito, piogenita y circón. Su textura es microcristalina afanítica y porfídica.

Por lo general su estructura es masiva, aunque también se observe estructura fluidal y amígdalas alargadas rellenas de calcita. Los afloramientos presentan fracturamiento en varias direcciones, el cual ha ocasionado la formación de bloques.

ANDESITA-TOBA INTERMEDIA, Ts (A-Ti). Unidad ígnea extrusiva formada por derrames y esporádicas intercalaciones de material piroclástico, la composición mineralógica de los derrames está representada por: andesina y oligoclasa, como minerales accesorios: augita, piogenita, circón y biotita, su textura es merocristalina.

Los horizontes tobáceos tienen la misma mineralogía de los derrames. La estructura de la andesita es masiva, con fracturamiento vertical y sub vertical, las tobas son deleznable y presentan poca resistencia a los agentes de meteorización.

LATITA, T (La). Latita afanítica de color gris pardo a rojo, ocasionalmente porfídica o con estructura vesicular. Su textura es holocristalina traquítica, contiene plagioclasa sódica en mayor proporción que feldespato potásico, augita, pigeonita, hematita, apatito, circón, hiperstena y antigonita, magnetita y calcita secundaria.

Sus posiciones relativas parecen indicar que cubren parcialmente a tobas ácidas y localmente también a basaltos; se le sobreponen claramente conglomerados terciarios y cuaternarios. Morfológicamente conforma pequeñas elevaciones orientadas al noroeste.

TOBA INTERMEDIA, Ts (Ti). Unidad en la que se incluyen tobas soldadas de composición traquítica a latítica de color gris, pardo y rojizo, textura piroclástica mero y holocristalina. Localmente presenta derrames traquíticos que se llegan a diferenciar cartográficamente. Está sobrepuesta por tobas ácidas y cubierta por conglomerados de terciario.

BASALTO, Ts (B). Unidad ígnea efusiva, formada mineralógicamente por: labradorita, con minerales accesorios: olivino y augita, unidos por una matriz de plagioclasas sódicas. Su textura es merocristalina afanítica.

Generalmente forma derrames de gran magnitud, por extrusión fisural o de un cono central. La roca es masiva con vesículas las cuales se encuentran rellenas de calcita, acusa disyunción columnar prismática, así como intercalación de horizontes de escoria volcánica y ceniza volcánica.

Al intemperismo desarrolla formas esferoidales. Sobreyace discordantemente a calizas del Cretácico Inferior y a rocas ígneas del Oligoceno-Mioceno.

La unidad es correlacionable con las emisiones basálticas ocurridas en el Plio-Cuaternario (Marc Tardy, 1977). La morfología está representada por: conos volcánicos, derrames con fase de malpaís y mesetas. Sus afloramientos son amplios.

BASALTO, Q (B). Unidad ígnea efusiva, formada mineralógicamente por: labradorita, con minerales accesorios: olivino y augita, unidos por una matriz de plagioclasas sódicas. Su textura es merocristalina afanítica. Generalmente forma derrames de extensión reducida, por extrusión fisural o de un cono central.

La roca es masiva con, así como intercalación de horizontes de escoria volcánica y ceniza volcánica. Al intemperismo desarrolla formas esferoidales.

Rocas ígneas intrusivas

GRANITO, T (Gr). Cuerpo intrusivo granítico, formado mineralógicamente por ortoclasa, cuarzo, albita y como mineral accesorio hematita, su textura es holocristalina fanerítica.

El fracturamiento en la roca, favorece el desarrollo de bloques y el intemperismo crea formas esferoidales. Intrusiona a caliza del Cretácico Inferior y originó una franja de metamorfismo de contacto (skarn) así como la formación de minerales de cobre (malaquita y azulita). La unidad se correlaciona con los emplazamientos intrusivos del Terciario (Clark et. Al., 1980 en S.P.P 1984) Geomorfológicamente forma lomerío de pendiente suave.

DIORITA, T (D). Roca ígnea intrusiva calco sódica, formada por oligoclasa con zoneamiento, como minerales accesorios: augita, biotita y tremolita-actinolita, su textura es holocristalina inequigranular. Presenta estructura masiva, fracturas verticales con dirección N-S, intrusionada por diques de la misma composición; el intemperismo ha dado origen a formas esferoidales y a la disgregación de la roca en gravillas de 5 a 10 mm de diámetro. Se infiere que afecta a la caliza del Cretácico Inferior. La roca se correlaciona con los intrusivos del Terciario. Su morfología es una planicie interrumpida por lomas aisladas de pendiente suave.

MONZONITA, T (Mz). Unidad constituida por un pórfido monzonítico de textura holocristalina equigranular, de color gris claro, compacto. La monzonita presenta fracturamiento intenso. La unidad está emplazada en rocas volcánicas cenozoicas.

SIENITA, T (Si). Pórfido cuarzo-sienítico. Muestra una textura fanerítica-porfídica de grano fino. Se distinguen minerales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo, estudios petrográficos reportan una textura perítica, con albita incluida en microclina, y la presencia de actinolita, esfena, magnetita y pirita.

Morfológicamente esta unidad se expresa en un crestón sobresaliente dentro de la unidad de tobas y derrames riódacíticos, en una relación poco clara en la que el pórfido parece intrusionar a las rocas mencionadas.

GRANODIORITA, T (Gd). Esta unidad consiste en granodioritas de textura holocristalina equigranular, generalmente de grano grueso y de color gris claro. La unidad presenta frecuentemente intemperismo esferoidal. Están emplazadas en las unidades calcáreas del Cretácico Inferior.

Rocas Metamórficas

SKARN, T (Skarn). Rocas calcáreas afectadas por metamorfismo de contacto compuestas por silicatos de calcio, con textura granoblástica, con granate, epidota, actinolita, wollastonita y sílice, cuyo conjunto ofrece un color gris pardo con vivos verdes. Esta unidad aflora al oeste del Cerro La Vinata y se le asigna una edad terciaria, dada la evidente relación de los cuerpos intrusivos terciarios con el metamorfismo y se encuentran restringidamente cubiertas por conglomerados terciarios. Su expresión morfológica es la correspondiente a la roca madre, calizas y conglomerados cretácicos.

Rocas Volcanosedimentarias

VOLCANOSEDIMENTARIO, Ti (Volcanosedimentario). Unidad formada por material ígneo piroclástico, depositado en zonas cercanas al centro de expulsión e intercalada con horizontes sedimentarios. Texturalmente en muestra de mano tiene una apariencia clástica samítica; al microscopio presenta textura volcánico-clástica, formada mineralógicamente por: cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca hematizadas y biotita, cementadas por carbonato de calcio, los fenocristales se encuentran en una matriz vítrea.

4.2 Geología Estructural

Por las características morfológicas y estructurales que se aprecian en el área, se distinguen zonas diferentes en cuanto al estilo de deformación continua de las unidades litológicas. La situada al oriente del área la forman anticlinales y sinclinales, amplios y simétricos con inclinación en sus flancos de 5 a 10 grados y orientación de los ejes estructurales NW-SE. El desarrollo de este tipo de estructuras suaves y abiertas fue debido a la competencia de la roca calcárea, a los esfuerzos de compresión.

Otra zona ubicada en la porción central en donde las estructuras están representadas por anticlinales y sinclinales en disposición aislada, con tendencia NW-SE y un ligero arqueamiento de los ejes; en este caso dichas estructuras son angostas y alargadas con vergencia al NE y echado hacia el SW, cabe hacer notar la presencia de anticlinales y sinclinales recumbentes en las sierras: La Pampas, El Mimbres, Las Margaritas y Barraza.

El plegamiento en esta zona es de moderado a intenso con pliegues isopacos y cerrados. La deformación discontinua está representada por dos tipos: las fallas de compresión y distensión, de las primeras se observaron pliegues-falla y fallamiento inverso de poca magnitud con vergencia hacia el NE, en la Sierra Camargo, este tipo de estructura también son observables en la zona occidental, así como una cabalgadura en el frente oriental de la Sierra Mezcalera en donde la secuencia occidental sobreyace tectónicamente a la unidad oriental.

Las estructuras distensivas, están representadas por fallas normales y fracturas; las primeras guardan una orientación NW-SE principalmente, con variaciones N-S, son las causantes de la separación de los bloques sedimentarios y la formación de fosas tectónicas y pilares característicos de las zonas central y oriental. Las fracturas forman dos familias una con orientación NE-SW y la otra NW-SE, que afectan a las unidades sedimentarias e ígneas.

Estructuras de origen ígneo extrusivo, se encuentran diseminadas en el área y se representan por derrames lávicos, conos y mesetas. Las de origen intrusivo están presentes en forma de diques y lacolitos, estos últimos deformaron a las rocas sedimentarias en forma dómica como en Cerro Los Reyes y Sierra Naica.

De las observaciones realizadas en el área se distinguieron tres fases de deformación: una fase compresiva del Cretácico Superior-Terciario Inferior que pliega las secuencias sedimentarias, un posterior emplazamiento de cuerpos intrusivos, que modifican localmente las estructuras existentes hacia formas dómicas. Una fase de ajuste isostático, que dio origen a pliegues de fondo y fracturas de orientación NNE-SSW, del Mioceno Superior M. Tardy (1977), D.A. Córdoba (1980) y observada en rocas ígneas, sedimentarias y volcánicas sedimentarias continentales del Terciario (Eoceno Mioceno Inferior). Una fase distensiva del Plioceno, representada por fallas de extensión, que formaron la Provincia morfológica de Sierras y Cuencas.

Por último, se denota un fracturamiento que afecta a las estructuras anteriores, así como lineamientos interpretados en las imágenes de satélite y de acuerdo con M. Tardy estas se relacionan con el sistema de fallas de San Andrés y el proceso de oceanización que ocurre en la parte sur del mar de Cortés.

4.3 Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada tanto en este acuífero como en los vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variable y conglomerados, de permeabilidad media a baja, que constituyen las planicies y los piedemonte. Hacia la parte baja del acuífero, donde se localiza la Laguna Palomas, predominan los depósitos lacustres. La porción inferior está alojada en rocas volcánicas: basaltos, tobas y riolitas, así como calizas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3).

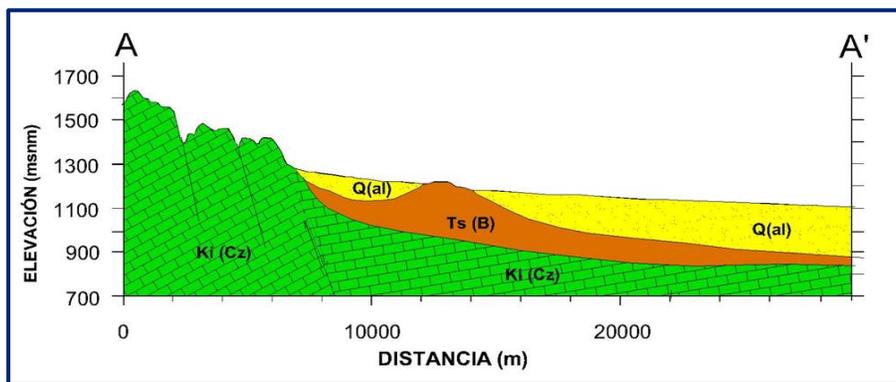


Figura 3. Sección geológica esquemática

Las fronteras al flujo subterráneo están definidas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias, al desaparecer el fracturamiento a profundidad. Se estima que el espesor del medio granular puede llegar a ser hasta de alrededor de 200 m, en este caso de aluvión, mientras que los derrames basálticos pudieran alcanzar aproximadamente un espesor similar en la zona de afloramiento.

Las rocas carbonatadas que subyacen toda la secuencia, presentan un sistema de fallas hacia la sierra, lo que podría representar una zona de recarga rápida a zonas bajas de esta misma unidad, así como a los otros dos medios porosos. Los afloramientos de basalto y rocas volcánicas fracturadas en general, cumplen el rol de zonas de recarga también.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

El acuífero de Laguna de Palomas, tiene lugar en la zona permeable de un depósito sedimentario formado por materiales granulares no consolidados y conglomerados, estos últimos interdigitados por rocas volcánicas permeables que forman también parte del acuífero.

Las fronteras laterales no son barreras impermeables ya que están constituidas por rocas calcáreas y volcánicas permeables, así las fronteras serían parteaguas hidrodinámicos.

No se presentan en el acuífero condiciones de confinamiento, por lo que el acuífero se considera tipo **libre**.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio elaborado en 2010, se realizaron 4 pruebas de bombeo, en la etapa de abatimiento, cuya duración varió de 4 a 12 horas.

De su interpretación por diversos métodos, se deduce que los valores de transmisividad varían de **$4.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** (40 m²/d) a **$0.002 \text{ m}^2/\text{s}$** (190 m²/d), con un valor promedio de 91.24 m²/d; en tanto que la conductividad hidráulica presenta valores que oscilan entre $4.63 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (0.4 m/d) a $3.47 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (3.0 m/d).

Ninguna prueba contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener el valor del coeficiente de almacenamiento de la manera tradicional. Sin embargo, el valor de rendimiento específico S_y se estima que varía de 0.10 a 0.15, obtenido mediante la interpretación de las pruebas de bombeo por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton, con un valor promedio de 0.11, que por correlación hidrogeológica coincide con los acuíferos vecinos que presentan una geología similar.

5.3 Piezometría

Se cuenta con información piezométrica generada en 2010, obtenida en una red de monitoreo conformada por 21 pozos, distribuidos en la mayor superficie de explotación del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad al nivel estático del agua subterránea en el acuífero Laguna de Palomas para 2010 (figura 4) presenta en el sureste del acuífero, las curvas de las menores profundidades observadas, esto es, del orden de los 30 m.

En cuanto a las profundidades máximas, éstas se presentan en la zona de alta concentración de pozos, situada al sur, en donde se aprecian profundidades que varían de los 60 a los 80 m aproximadamente.

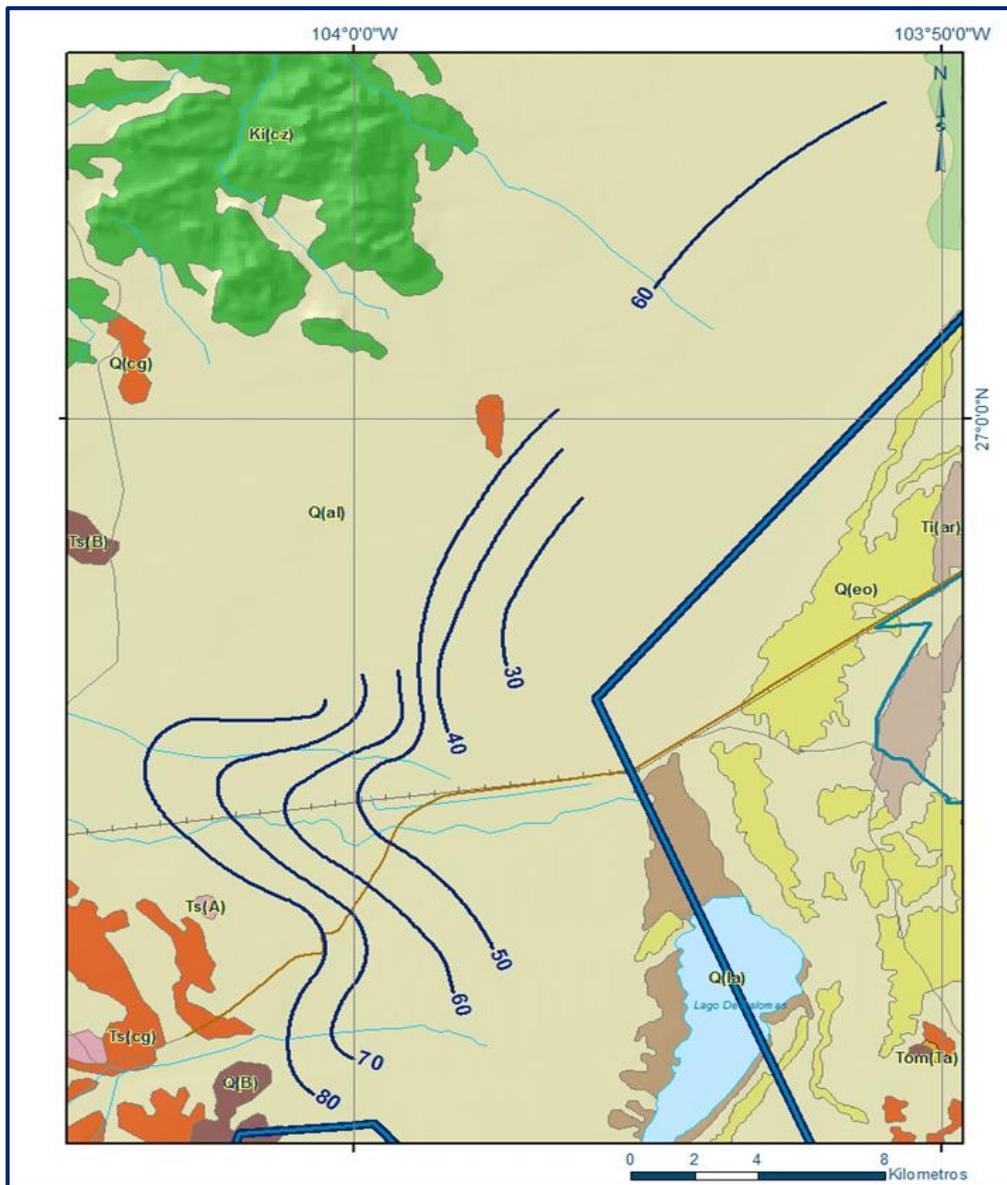


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

Que en condiciones originales sería hacia la Laguna de Palomas, sin embargo, a la fecha se distorsiona dicho flujo debido a las extracciones por bombeo.

5.4.3 Evolución del nivel estático

No se cuenta con datos de evolución del nivel estático ya que en este acuífero no existe información previa requerida para este fin, solo existen los datos recabados en el estudio del año 2010.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Debido al escaso número de aprovechamientos, a las dificultades de acceso a ellos y al incipiente volumen de extracción del acuífero, a la fecha no se ha realizado muestreo de aguas subterráneas para su análisis correspondiente.

Durante recorrido de campo realizado en el 2010, fue posible obtener en campo algunos parámetros físico químicos del agua en ciertos pozos, teniendo como promedio: pH = 7.9, SDT = 2,365 ppm, C.E. = 3900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y T= 22.8° C.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo de aprovechamientos realizado en 2010, existen 79 aprovechamientos. Del total de obras, 35 se encuentran activas, 32 inactivas y 12 en abandono.

El volumen de extracción total calculado es de **63.3 hm³** anuales, de los cuales, 63.2 hm³ (99.8 %) se destinan para uso agrícola y los 0.1 hm³ restantes (0.2 %) para otros usos, doméstico y pecuario.

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. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 866 km², que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea de donde se obtuvo información.

7.1. Entradas

Las entradas al acuífero Laguna de Palomas están integradas básicamente por entradas subterráneas (Eh), la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv) y entradas por retorno de aguas de riego (Rr).

7.1.1 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del 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 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 2010 (Figura 6). De acuerdo con la ecuación de Darcy par 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:

$$\text{Donde: } V = K \cdot i$$

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica

i = Gradiente hidráulico

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:

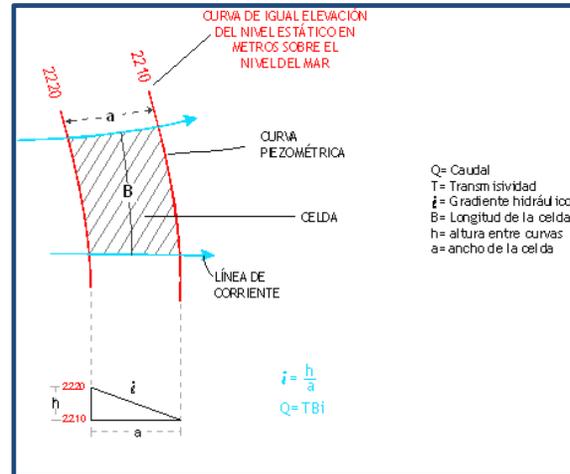
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

T = Transmisividad

B= Longitud de la celda

i = Gradiente Hidráulico



El cálculo de las entradas subterráneas para 2010 se presenta en la Tabla 2 siendo éstas de **9.4 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de Entradas por flujo subterráneo horizontal (2010)

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	12170	3480	40	0.01149	0.0003	0.0420	1.3
E2	6960	2610	10	0.00383	0.0010	0.0267	0.8
E3	6960	2090	10	0.00478	0.0010	0.0333	1.1
E4	7000	2780	10	0.00360	0.0010	0.0252	0.8
E5	3480	2260	10	0.00442	0.0010	0.0154	0.5
E6	4700	1390	10	0.00719	0.0005	0.0169	0.5
E7	5220	1390	20	0.01439	0.0003	0.0225	0.7
E8	6960	2170	40	0.01843	0.0003	0.0385	1.2
E9	5740	870	20	0.02299	0.0003	0.0396	1.2
E10	8350	2260	10	0.00442	0.0003	0.0111	0.3
E11	7650	3480	40	0.01149	0.0003	0.0264	0.8
TOTAL							9.2

7.1.2 Recarga vertical por lluvia (Rv)

Esta componente considera el volumen de agua infiltrado procedente de la precipitación; por lo que para calcularla, dentro del área de balance, se tiene la relación:

Rv = Volumen infiltrado en todo el acuífero - Eh

Rv = [(Vol. Llovido en acuífero) * (Coeficiente de Infiltración)] - Eh

Del balance hidrometeorológico para Laguna de Palomas, realizado en el estudio de Actualización Geohidrológica en el año 2010, se considera un coeficiente de infiltración para el acuífero de 2.0%,

$$Rv = [(1615 \text{ Km}^2) (0.3245 \text{ m/año}) *(0.02)] - 9.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

$$Rv = [(524.26 \text{ hm}^3/\text{año}) *(0.02)] - 9.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

$$\mathbf{Rv = 1.1 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

7.1.3 Retornos de Riego (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 las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. A 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. Para este caso, se consideró que un 20 % de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando una profundidad media al nivel del agua subterránea de 80 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo. De esta manera, si el volumen de extracción para uso agrícola es de 63.18 hm³ anuales, la recarga inducida es:

$$Rr = 63.18 \text{ hm}^3 * 0.2$$

$$Rr = 12.6 \text{ hm}^3$$

$$\mathbf{Rr = 12.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y posiblemente a través de salidas subterráneas pero no se cuenta información piezométrica para su estimación.

No existen manantiales, ni flujo base en ríos.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **63.3 hm³/año**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento no se cuenta con configuraciones de evolución, aunado a que tampoco es posible considerar evolución cero, debido a que en los últimos años se ha extendido la extracción para fines agrícolas, se expresa esta componente como una incógnita a evaluar de la ecuación de balance de agua subterránea.

$$Eh + Rv + Rr - B = \Delta V(S)$$
$$\Delta V(S) = Eh + Rv + Rr - B \quad (1)$$

Como consecuencia de la explotación del recurso para el uso agrícola, la posición del nivel piezométrico ha descendido en algunas zonas, sobre todo en el área de concentración que abarca la zona de balance.

Solución a 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 (1) que fue establecida con anterioridad:

$$\Delta V(S) = 9.4 + 1.1 + 12.6 - 63.3$$
$$\Delta V(S) = -40.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y los retornos.

$$R = Eh + Rv + Rr$$
$$R = 9.4 + 1.1 + 12.6$$
$$R = 23.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

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

Para este caso su valor es **23.1 hm³/año**.

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 están comprometidos 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 del acuífero Laguna de Palomas no existen descargas naturales comprometidas.

Por lo tanto, **DNC = 0.0**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **21,821,151 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 aguas subterráneas (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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 23.1 - 0.0 - 21.821151 \\ \text{DMA} &= 1.278849 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,278,849 m³ anuales**.