



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNA DE TARABILLAS (0814),
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 | 6 |
| 3. FISIOGRAFÍA..... | 9 |
| 3.1 Provincia Fisiográfica..... | 9 |
| 3.2 Clima..... | 9 |
| 3.3 Hidrografía..... | 10 |
| 3.4 Geomorfología..... | 11 |
| 4. GEOLOGÍA..... | 11 |
| 4.1 Estratigrafía..... | 13 |
| 4.2 Geología estructural | 18 |
| 4.3. Geología del subsuelo..... | 21 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA..... | 23 |
| 5.1 Tipo de acuífero..... | 23 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos..... | 24 |
| 5.3 Piezometría..... | 25 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico..... | 25 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático..... | 25 |
| 5.4.2. Elevación del nivel estático..... | 26 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático..... | 27 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea..... | 27 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA | 29 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 30 |
| 7.1 Entradas..... | 30 |
| 7.1.1 Recarga natural..... | 30 |
| 7.1.2 Recarga vertical (Rv)..... | 30 |
| 7.1.3 Entradas subterráneas horizontales (Eh)..... | 31 |
| 7.2 Salidas..... | 32 |
| 7.2.1 Extracción por bombeo (B)..... | 32 |
| 7.2.2 Salidas subterráneas (Sh)..... | 32 |
| 7.2.3 Evapotranspiración (ETR)..... | 32 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (Δv_s)..... | 33 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 34 |
| 8.1 Recarga total media anual (R)..... | 34 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)..... | 34 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)..... | 35 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 35 |

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 Laguna de Tarabillas, definido con la clave 0814 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Chihuahua; 120 km al norte de la ciudad de Chihuahua y 60 km al sureste del poblado Villa Ahumada. Comprende parcialmente a los municipios Ahumada y Chihuahua. Tiene una extensión total de 2,433 km² y está comprendido dentro del rectángulo formado por las coordenadas 29° 31' a los 30° 19' de latitud norte y 106° 03' a los 106° 34' de longitud oeste, aproximadamente, Colinda al norte con el acuífero Laguna de Patos, al este con Laguna Tres Castillos, al sur con Laguna de Hormigas y el Sauz-Encinillas y al oeste con el acuífero Flores Magón –Villa Ahumada (Figura 1).

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



Figura 1. Localización del acuífero

La población en la zona está distribuida en 29 localidades de los dos municipios que comprende parcialmente el acuífero. Según los datos del XII Censo de Población y Vivienda, en el año 2000 la población total era de 292 habitantes la cual se localiza principalmente en el municipio de Ahumada. Su tasa de crecimiento anual de 1995 a 2000 fue de -1.28% en promedio. Las actividades económicas más importantes en la zona son la agricultura y la ganadería, las cuales de manera general son incipientes. Los servicios con los que cuenta la población ubicada en la zona son: telefonía, telefonía celular y electricidad.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

| ACUÍFERO 0814 LAGUNA DE TARABILLAS | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1 | 106 | 20 | 34.9 | 30 | 14 | 21.4 |
| 2 | 106 | 12 | 55.3 | 30 | 15 | 5.3 |
| 3 | 106 | 10 | 20.6 | 30 | 18 | 9.5 |
| 4 | 106 | 5 | 30.5 | 30 | 6 | 0.5 |
| 5 | 106 | 3 | 8.2 | 29 | 50 | 44.7 |
| 6 | 106 | 14 | 45.0 | 29 | 47 | 12.2 |
| 7 | 106 | 13 | 26.0 | 29 | 39 | 2.5 |
| 8 | 106 | 13 | 28.1 | 29 | 34 | 41.4 |
| 9 | 106 | 15 | 15.3 | 29 | 31 | 7.5 |
| 10 | 106 | 31 | 20.6 | 29 | 39 | 41.5 |
| 11 | 106 | 30 | 16.4 | 29 | 42 | 52.4 |
| 12 | 106 | 32 | 4.4 | 29 | 45 | 22.8 |
| 13 | 106 | 32 | 7.0 | 29 | 49 | 55.4 |
| 14 | 106 | 30 | 31.4 | 29 | 58 | 32.0 |
| 15 | 106 | 33 | 28.3 | 30 | 2 | 20.2 |
| 16 | 106 | 26 | 7.3 | 30 | 2 | 12.1 |
| 17 | 106 | 23 | 27.1 | 30 | 6 | 45.9 |
| 1 | 106 | 20 | 34.9 | 30 | 14 | 21.4 |

1.2. Situación Administrativa del Acuífero.

El acuífero pertenece a la región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo y se encuentra sujeto en un 32% (778 km²) de la superficie al establecimiento de dos vedas: la que estableció el Distrito de Riego El Carmen (1957) y la emitida para la zona conocida como Cuenca del Sauz y Encinillas (1978), quedando la superficie complementaria de 68% del territorio en el que se aloja el acuífero, como libre para el alumbramiento de las aguas del subsuelo.

Zonas de Disponibilidad

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

La porción oeste del acuífero está cubierta por el acuerdo que establece el Distrito de Riego de “El Carmen” en San Buenaventura y Villa Ahumada, Chih. y declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas. Publicado en el Diario Oficial el 30 de enero de 1957. El Acuerdo en su artículo Primero establece el Distrito de Riego de El Carmen ubicado en los municipios de San Buenaventura y Villa Ahumada, estado de Chihuahua, y se declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas, en la inteligencia que el Distrito tendrá provisionalmente los límites que se mencionan en el Decreto.

En su artículo Segundo se declara por tiempo indefinido veda para el otorgamiento de concesiones con aguas del Río de El Carmen y de toda su cuenca tributaria, así como las aguas de la Laguna de Patos y sus afluentes.

Artículo Tercero. Se establece veda por tiempo indefinido, para el alumbramiento de las aguas del subsuelo en la región delimitada según el artículo primero.

El artículo Cuarto, indica que “excepto cuando se trate de alumbramiento para usos domésticos, a partir de la fecha en que este acuerdo entre en vigor, nadie podrá efectuar alumbramientos de agua del subsuelo dentro de la zona vedada sin previo permiso por escrito de la autoridad del Agua, la que solo lo expedirá en los casos que de los estudios respectivos se deduzca que no se causarán los daños que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse”.

Al efecto, los interesados en alumbrar aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, inclusive compañías y contratistas particulares que las realicen, no podrán efectuarlas sin contar previamente con el permiso correspondiente y, de obtenerlo, estarán obligados a realizar las obras de conformidad con las especificaciones que en el permiso se fijan por dicha Autoridad. En una pequeña porción al sur del acuífero existe un Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona conocida como Cuenca del Sauz y Encinillas, ubicados en el municipio de Chihuahua, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 12 de enero de 1978.

Los artículos del mencionado decreto contienen lo siguiente:

Artículo Primero.- Se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie que comprende la zona conocida como Cuenca del Sauz y Encinillas, pertenecientes al Municipio de Chihuahua, estado del mismo nombre, porción que no fue vedada por los Decretos Presidenciales que establecieron veda por tiempo indefinido en las regiones de Chihuahua, Villa Ahumada, Delicias y Distrito de Riego El Carmen, de ese Estado, publicados en el Diario Oficial de la Federación los días 7 de febrero de 1952, 31 de diciembre de 1953, 16 de junio de 1962 y 30 de enero de 1957, respectivamente, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona.

Artículo Segundo.- Por causa de interés público, se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en la región mencionada en el artículo anterior.

Artículo Tercero.- Excepto cuando se trate de extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia del presente Decreto, nadie podrá ejecutar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la autoridad del Agua, ni extraer o aprovechar las mencionadas aguas sin la concesión o asignación que expida también, según el caso, la propia Autoridad.

Hasta ahora, la explotación del acuífero Laguna de Tarabillas es poco significativa. Dado que la principal actividad económica de la región es la ganadería y a que sólo existen pequeñas comunidades y rancherías diseminadas en la cuenca, la extracción se reduce a pequeñas cantidades de agua, del orden de 3.3 hm³ por año, para uso pecuario y doméstico.

Sin embargo, en los últimos años, grupos de productores han emprendido ambiciosos proyectos de desarrollo agrícola, en la porción no vedada, en conjunto, tienen gran capacidad de extracción. Una vez que se inicie su operación, se espera que la extracción rebase la recarga o volumen renovable del acuífero, que es de reducida magnitud debido a la aridez de la región.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

A continuación, una breve reseña cronológica de los estudios más importantes. De los estudios más antiguos que se tiene conocimiento, está el de Staehelin (1928), en época de la post-revolución mexicana, que se refiere a los depósitos polimícticos de la Sierra La Mojina (al suroccidente de la Sierra Los Arados y al occidente del área), de donde toma el nombre para referirse a estos depósitos como Conglomerado Mojina de edad Pérmico Superior.

En Bockoven (1976), publica su tesis de maestría relacionada con la petrología y estratigrafía de las rocas volcánicas que afloran en la zona del Sueco (norte de la Sierra Gallego del Gallego).

Keller (1977), en su tesis de doctorado realiza la cartografía geológica de la región de la Sierra del Gallego, que no incluye Bockoven (1976).

Por su parte, Dayvault (1979) en su tesis de maestría realiza la cartografía geológica del cañón de Santa Clara, al noroccidente de la Sierra Tinaja Lisa.

En 1980, Cameron et al., después del análisis de una franja que comienza en Topolobambo, Sinaloa y que termina en Ojinaga, Chihuahua, definen la presencia de tres suites de rocas volcánicas del Terciario medio en el estado de Chihuahua.

De acuerdo con la clasificación realizada es posible distinguir: i) suite calco-alcalina con facies de alto y bajo contenido de potasio, ii) suite basáltica medianamente alcalina y iii) suite de riolita con ferroaugita (peralcalina).

En 1981, la Asociación Americana de Geólogos Petroleros (AAPG, por sus siglas en inglés) publica un volumen especial sobre la exploración de uranio en rocas volcánicas, de donde sobresalen varios artículos relacionados con la geología de las sierras próximas al Valle de Tarabillas, como se describen a continuación.

Bockoven (1981) estudia la estratigrafía de las rocas volcánicas de la Sierra del Gallego y hace un análisis comparativo con la geología del distrito minero de uranio Peña Blanca (al sur del área).

Mauger (1981), publica un compendio de los trabajos anteriores, complementado con recorridos de campo adicionales, quien propone nombres informales, reporta detalladas descripciones de afloramientos y láminas delgadas, además de edades absolutas para las diferentes unidades litológicas ígneas.

Capps (1981), investiga la porción sur de la Sierra Sacramento (rancho el Papalote) al oriente del Valle El Sáuz-Encinillas (al sur del área), quien describe las rocas carbonatadas del Cretácico que subyacen a la secuencia volcánica en esa zona. Con base en descripciones litológicas y determinaciones de edades absolutas subdivide la secuencia volcánica terciaria en ocho unidades informales.

Stege y Pingitore (1981) analizan a detalle las formaciones calcáreas de la zona central de la Sierra Peña Blanca (al sur del área), definiendo que son correlacionables con las formaciones El Abra, Tamaulipas y Cuesta del Cura.

Distinguen diferentes facies (lagunar, pre-arrecifal, núcleo del arrecife, post-arrecifal, etc.) en cada una de las formaciones.

Aiken et al. (1981) realizan un trabajo de geofísico regional, que incluye al área de Tarabillas. Utilizan información magnética y gravimétrica para definir las características tectónicas y estructurales del subsuelo. El análisis de la anomalía residual de segundo orden, aplicado a la información de la anomalía de Bouguer, señala que existe un bajo gravimétrico en dirección norte-sur, sobre una serie de montañas que incluye a la Sierra del Gallego, entre otras. Los valles, se correlacionan con bajos gravimétricos y las sierras con altos gravimétricos. De acuerdo con los autores, este es un caso típico de las estructuras de la Provincia de cuencas y sierras, donde se ubica el Valle de Tarabillas.

Un año más tarde (1982), en el Boletín de la Sociedad Geológica de América, Keller et al. presentan un compendio de las investigaciones anteriores, donde se definen formalmente siete unidades volcánicas (formaciones: Liebres, Andesita Rancho El Ágate, Riolita Gallego, Riolita Mestreño, Riolita Agua Nueva, Riolita Carneros, Basalto Milagro) que afloran en la Sierra del Gallego y la zona del Sueco. Además, presentan dataciones absolutas (método de K-Ar) de algunas unidades, análisis geoquímicos de las rocas volcánicas y una descripción de las principales estructuras del área.

En 1989, Cameron et al. analizan a nivel regional la distribución y características de la suite basáltica medianamente alcalina, denominándolas Andesitas Basálticas de la Cordillera Sur (SCORBA, por sus siglas en inglés). Por la extensión en que han sido reportadas, esta unidad puede constituir la suite basáltica del Cenozoico más extensa en Norte América. Correlacionan a la suite SCORBA de México con el Basalto Grande Ronde, la unidad más voluminosa del Grupo Río Columbia, que cubre alrededor de 200,000 km² en los estados de Washington, Oregon e Idaho de USA.

Un trabajo geológico reciente, y probablemente el más completo en cuanto a la estratigrafía de las rocas volcánicas de la porción central del estado de Chihuahua, lo presentaron MacDowell y Mauger (1994). Utilizando 102 edades absolutas calculadas por el método de K-Ar y 14 por el método de U-Pb, proponen la ocurrencia de un magmatismo entre 68 y 25.5 Ma y que puede separarse en dos períodos.

El primero entre 68 y 46 Ma, de poca importancia en cuanto a volumen se refiere, relativamente.

El segundo evento se presenta en un lapso de 46 a 27.5 Ma, con un vulcanismo muy intenso, produciendo dos secuencias de flujos de cenizas félsicas, separados por una secuencia de lavas porfídicas y tobas de composición que varía de félsica a intermedia. Posteriormente, la secuencia anterior de naturaleza calco-alcalina fue acompañada por una andesita basáltica alcalina y tobas riolíticas con características peralcalinas.

En el 2005 la CNA realiza el estudio “Reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos Laguna La Vieja, Laguna de Santa María, Laguna de Tarabillas, Los Juncos y Flores Magón-Villa Ahumada, del estado de Chihuahua”, con la finalidad de – como su nombre lo indica-, implementar una red de medición de los niveles del agua subterránea, que en el caso del Valle de Tarabillas será de inicio para darle un seguimiento continuo, por tratarse de un sistema-acuífero en vías de desarrollo.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

El área se localiza en la porción sur de la provincia fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte (INEGI; carta fisiográfica 1:1'000,000), la cual se extiende desde las sierras transversales de la Sierra Madre Oriental, por todo el centro y oeste de Coahuila, y el oriente chihuahuense, hasta los estados de Texas y Nuevo México, en Estados Unidos. El origen de esta provincia árida y semiárida, está relacionado, entre otros eventos, con el plegamiento de las secuencias marinas del mesozoico que se desarrollaron sobre un basamento Paleozoico y Precámbrico, así como con el relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos derrames lávicos, que coadyuvieron a la formación de cuencas endorreicas.

Dominan las rocas volcánicas félsicas en las zonas montañosas que rodean a la planicie aluvial (llano) del Valle de Tarabillas, que se caracteriza por ser una zona de inundación con acumulaciones salitrosas. A estas llanuras, comúnmente se les denomina “barrales”.

3.2 Clima

Según la clasificación de climas de Köppen, modificado por García (1973), en el área existen dos tipos de climas, denominados: i) Muy seco (BW) y ii) Seco (BS0), ambos pertenecen al Grupo de los climas secos (B). Localmente en el área del acuífero se presentan precipitaciones que oscilan desde 320 mm hasta 390 mm, con promedio de 355 mm, con periodo de lluvias de junio a octubre, siendo julio el mes más lluvioso y marzo el mes más seco. El registro de los datos es de 1949 al 2001.

Temperatura media anual

La temperatura media anual se mantiene constante, presentando pequeñas oscilaciones entre 16.7 y 17.1° C, con promedio local de 16.9° C, en el periodo 1961 a 1988. El período más caluroso se presenta de mayo a septiembre con temperaturas por arriba de los 20° C.

El período menos caluroso se presenta de diciembre a enero con temperaturas inferiores a los 10° C. Puntualmente julio es el mes más caluroso donde se han alcanzado temperaturas superiores a 25° C.

Precipitación Media Anual

El periodo con registros para el análisis de la evaporación media mensual es de 1961 a 2001 presentando máximos de abril a junio; y en enero y diciembre se presentan los valores mínimos. En el área del acuífero se presenta una evaporación anual entre los 1,850 y 2,050 mm, con promedio de 1,950 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero Laguna de Tarabillas hidrológicamente pertenece a la Región No. 34 Cuencas Cerradas del Norte y en particular, a la Cuenca Laguna Tarabillas, que es una de varias cuencas endorreicas que se localizan en la región.

El sistema de drenaje principal lo constituye el arroyo Chivatita, que nace cerca de la estación El Gallego y sigue una dirección de sur a norte por el lado oeste de la carretera Chihuahua-Ciudad Juárez y desemboca en una laguna que no tiene nombre. Por el lado oriente del valle fluye una corriente principal que al parecer carece de nombre y que alimenta a la Laguna de Tarabillas, es generada desde el parteaguas sur que corre predominantemente hacia el norte y que recibe varios afluentes tanto por la margen derecha como por la izquierda.

Las corrientes son de carácter intermitente, atribuidas a escurrimientos torrenciales generados durante la época de lluvias.

La laguna es un cuerpo de agua intermitente cuya extensión varía estacionalmente a lo largo del tiempo, dependiendo de las aportaciones superficiales y subterráneas que recibe, así como de la cantidad de agua que pierde por la intensa evaporación.

3.4 Geomorfología

La zona se localiza en una región cuya morfología peculiar es de bolsones, esto es, de cuencas con drenaje interno, más o menos rodeadas de sierras de las que se extienden las amplias bajadas aluviales sobre las llanuras centrales. Las sierras son abruptas y se levantan de 500 a 1000 m sobre las llanuras y de 2000 a más de 2400 msnm (Sierra Gallego, 2440 msnm en su parte más alta); gran parte de las sierras están rodeadas de amplias bajadas que las semisepultan. La llanura se encuentra a unos 1400 msnm.

En la zona que corresponde a la Sierra del Gallego, el drenaje es de tipo dendrítico desarrollado en rocas volcánicas. Consiste de ramificaciones irregulares en todas direcciones, con tributarios uniéndose a las corrientes principales en cualquier ángulo. Refleja rocas con resistencia uniforme a la erosión, sin un marcado control estructural que la defina.

De manera general, la zona presenta una pendiente preferencial en dirección oeste-este. La pendiente general en dirección norte-sur es de relativa menor importancia, situación que es un reflejo del control estructural de la zona. Este control se refleja, además, en las características de la distribución particular de la pendiente del terreno en los tres principales elementos fisiográficos de la zona.

La disposición de las elevaciones topográficas indica que las mayores elevaciones se ubican al suroccidente del área, a partir de donde disminuyen en dirección del Valle de Tarabillas. De acuerdo con su naturaleza volcánica, esta sierra es muy abrupta, por lo que en las partes altas (>2000 msnm) predominan pendientes mayores a 45°. En los cañones de las corrientes principales, las pendientes para las elevaciones menores a 2000 msnm oscilan entre 20° y 30°.

4. GEOLOGÍA

La geología la representan, rocas sedimentarias e ígneas, cuyas edades varían del Cretácico inferior al Holoceno, que descansan sobre un basamento metamórfico (PEMEX, 1969, en COREMI, 2002), que guarda una relación directa con el cratón precámbrico de Norteamérica; además, de que la zona se localiza al nororiente del megashear Mojave-Sonora (Anderson y Smith, 1983). También es probable, que, entre el basamento y la secuencia marina mesozoica, exista un conglomerado polimíctico, asociado al que reporta Staehelin (1928), en la Sierra La Mojina, de cuya localidad toma su nombre de Conglomerado Mojina, al occidente del área (Figura 2).

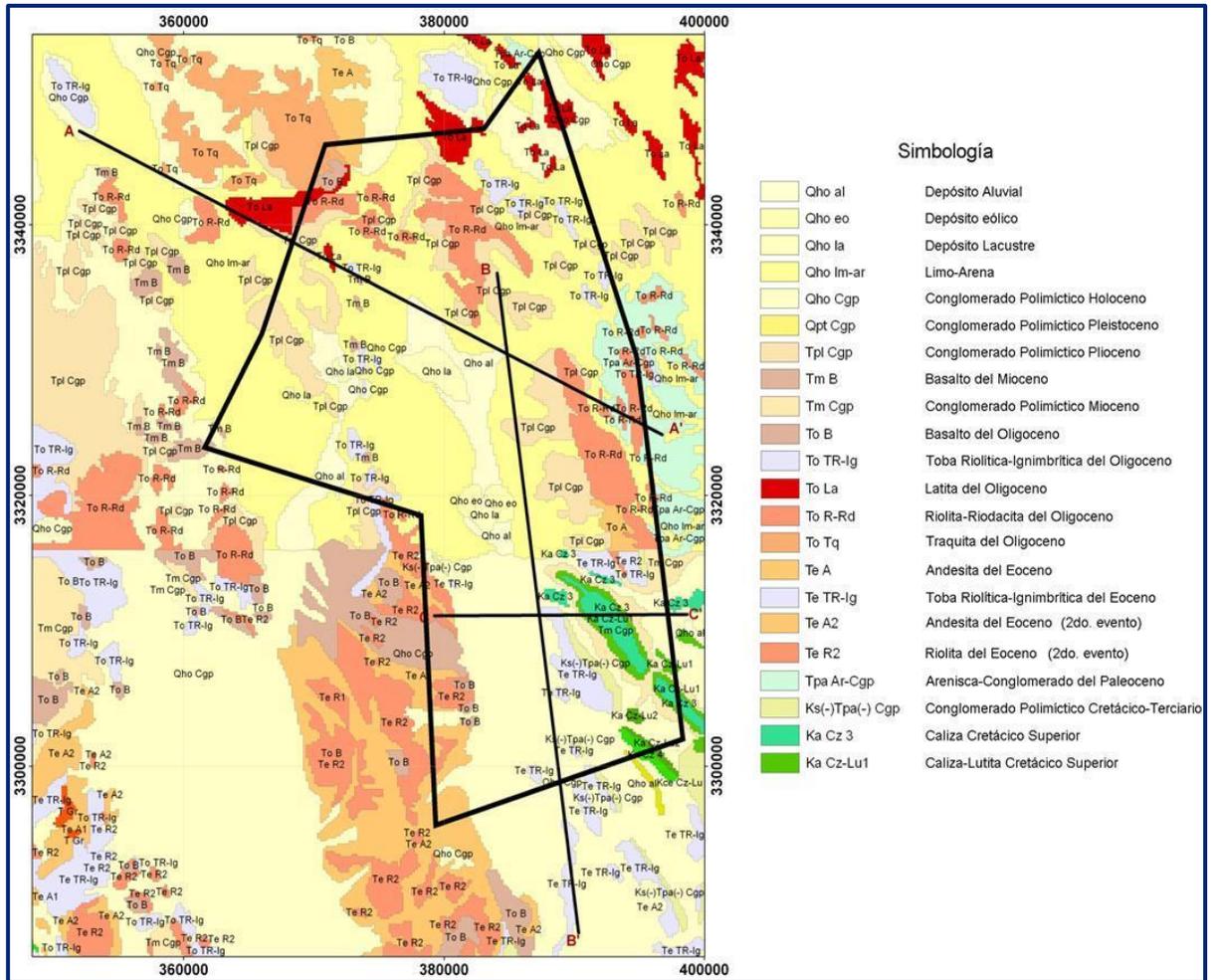


Figura 2. Geología general del acuífero

Las rocas del Cretácico Inferior que afloran en el área, está representadas por tres formaciones sedimentarias de ambiente marino, las cuales se depositaron concordantemente, una a otra, en el orden siguiente: Walnut (calizas arcillosas y margas), Edwards (calizas) y Kiamichi (lutitas y calizas).

Al final del Cretácico superior, bajo condiciones marinas se depositaron concordantemente las formaciones sedimentarias: Georgetown (calizas). Del Río (lutitas y calizas arcillosas) y Buda (calizas arcillosas). La variabilidad litológica y el tipo de fauna fosilífera de estas formaciones, sugieren una variación del nivel del mar importante. El Cretácico Superior -Paleoceno está representado por el Conglomerado Pozos, que marca el cambio entre las rocas calcáreo-arcillosas del Mesozoico y las volcánicas del Cenozoico.

Cubriendo en discordancia a la secuencia estratigráfica sedimentaria antes descrita, se tiene una sucesión de eventos volcánicos, representados por rocas de diversa composición (andesitas, tobas andesíticas, riolitas, tobas riolíticas-ignimbritas, andesitas y basaltos), que se emplazaron durante el Eoceno-Oligoceno. Asimismo, rocas plutónicas (traquitas y latitas) en el Oligoceno.

En el Pleistoceno, las condiciones favorecieron la conformación de un conglomerado polimíctico y areniscas y depósitos de arcillas distribuidas en los valles intermontanos. Finalmente, durante el Holoceno, se tienen depósitos de aluviones sobre los cauces de los arroyos y en las partes bajas con áreas de cultivos; además, depósitos lacustres de granulometría fina, en las porciones centrales del valle.

4.1 Estratigrafía

En el área, se han reportado unidades litoestratigráficas de diferentes orígenes y edades. Las más antiguas, son una secuencia de rocas marinas carbonatadas mesozoicas, las cuales están parcialmente cubiertas por una secuencia cenozoica de rocas diversas de ambiente continental, fundamentalmente: volcánicas, volcanoclásticas, plutónicas y sedimentarias (detríticas). El evento más reciente, lo representan depósitos sedimentarios modernos, de granulometría heterogénea. A continuación, la descripción de cada una de estas unidades litoestratigráficas, con sus nombres formales, en el caso de las formaciones mesozoicas e informales, para la secuencia de unidades cenozoicas.

Mesozoico

Formación Walnut (KaLuCz1). Caliza nodular, color gris claro, en capas medianas y de limolitas calcáreas, color gris claro, en estratos delgados, que cubre concordantemente a unidades litológicas más antiguas (Fm Aurora). Aflora en las sierras surorientales que limitan con el Valle de Tarabillas y en la parte oriental de la Sierra de Los Fierros (al nororiente del área).

En la Sierra de Los Fierros el espesor completo es de 32 m. Se distinguen dos unidades; i) Unidad inferior. Caliza nodular de grano fino, color gris oscuro, con coquina de *Orbitolina* sp. e interestratos de limolita calcárea color gris, con *Astare* sp., ii) Unidad superior. Caliza nodular y capas de caliza de color gris claro, en estratificación gruesa, con *Orbitolina* sp., *Exogyra texana* sp. y coquina de *Gryphaea* sp. Por relaciones estratigráficas y paleontológicas, se asume que la formación pertenece al Albiano Medio.

Formación Edwards (KaCz3). Consiste de un conjunto carbonatado de cuatro miembros. El miembro inferior, consiste de dolomía, caliza dolomítica y caliza gris masiva, con contenido de rudistas y pedernal negro. El siguiente miembro, es de estratificación delgada de caliza dolomítica y caliza, de grano fino. Es común el pedernal. El tercer miembro consiste de caliza (micrita) con pistas formadas con aportaciones de terrígenos. El miembro superior consiste de calizas que subyacen a una caliza dolomítica y a una calcarenita con granos de glauconita. Es concordante con las formaciones que la limitan (Walnut y Georgetown).

Las rocas de la Fm Edwards representan depósitos de una gran variedad de ambientes carbonatados (arrecifal, lagunar, cuenca y supramarea). Algunas de las calizas fueron alteradas a dolomía por invasión de aguas meteóricas, inmediatamente después de su depositación. Aflora en el núcleo del anticlinal de la Sierra Ponce, oriente de la zona.

Formación Kiamichi (KaceLu-Cz2). Formación definida por Hill (1891), que consiste de mudstone y wackestone, en estratos delgados, intercalados con lutitas calcáreas nodulares, con limonita y pedernal; están constituidos por más del 10% de aloquímicos, los cuales corresponden con foraminíferos y moldes calcíticos de radiolarios.

El contacto inferior es concordante con la Fm. Edwards. Se le considera del Albiano medio con base en la presencia de *Oxytropidoceras* sp. Se depositó en facies de plataforma abierta. Aflora en el borde norte de los lomeríos aislados al sur de la Sierra Ponce, oriente del valle de Tarabillas.

Formación Georgetown (KaCz4). Unidad definida por Hill (1901). Está constituida por estratos delgados de mudstone a wackestone de calciesferúlidos con nódulos de pedernal. Se depositó concordantemente sobre la Fm. Kiamichi. Su edad corresponde al Albiano tardío con base en la presencia de *Kingena* sp. Se acumuló en un ambiente de plataforma externa. Sus afloramientos dentro del área, se localizan al sur de la Sierra Ponce (oriente del Valle de Tarabillas), con expresión de lomeríos.

Formación Del Río (KceLu-Cz). Formación definida por Hill y Vaughan (1898) que consiste de lutitas intercaladas con mudstone y wackestone, en la base y con areniscas en la cima. Por su contenido faunístico de *Drakeoceras* sp. se le asigna al Cenomaniano temprano. Su depósito se asocia a facies de plataforma con aporte de terrígenos. Descansa concordantemente a la Fm. Georgetown.

Formación Buda (KceCz). Definida por Vaughan (1900) consiste de mudstone y wackestone en estratos delgados a medios y en ocasiones con algunas intercalaciones de margas. Sobreyace concordantemente a la formación Del Río. Con base en la presencia de Budaiceras sp. se asigna al Cenomaniano medio. Esta unidad se acumuló en una plataforma estable con influencia de mar abierto. Sus afloramientos en la zona, se restringen al norte y sur de la Sierra Ponce, oriente del área.

Formación Pozos (KTpaCgp). Está constituida por una interestratificación de areniscas pobremente seleccionadas y capas de conglomerado polimíctico, con fragmentos de calizas y andesitas, que marca el cambio entre las rocas calcáreo-arcillosas y volcánicas. La cubre discordantemente un conjunto de rocas volcánicas y volcanoclásticas. Este proceso erosivo se presenta a finales del Mastrichtiano y culmina en el Paleoceno. Sus principales afloramientos, se localizan al sur del área, en las partes topográficamente bajas de la Sierra del Gallego y de las serranías que delimitan al oriente al Valle de Tarabillas.

Terciario

Rocas ígneas del Paleoceno-Eoceno temprano (TeA1). Unidad que consiste de lavas de composición intermedia, intercaladas con brechas, unidades clásticas gruesas y algunas tobas félsicas. Afloran principalmente al occidente de la carretera Federal No. 45 y en la Sierra de la Tinaja Lisa. Se estima que el conjunto, alcanza un espesor de varias centenas de metros. Estas unidades volcánicas, representan la actividad ígnea más antigua de la región, con edades que oscilan entre los 68 Ma (K-Ar) y 67.51 Ma (U-Pb).

Tobas del Eoceno (TeR1, TeTR-Ig). Conforman a esta unidad, flujos de cenizas y tobas de caída (air-fall tuffs) con sedimentos tobáceos asociados. Keller et al. (1982) definieron al menos 8 tipos diferentes de tobas incluidos en esta unidad. En general estas tobas líticas-vítreas, presentan soldamiento variable, tienen pumicita y fragmentos líticos. Afloran ampliamente en la porción sur de la Sierra del Gallego y al occidente de la carretera Federal No. 45. Estas tobas eocénicas sobreyacen discordantemente a las rocas del complejo volcánico del Cretácico Tardío (MacDowell y Mauger, 1994).

Lavas porfídicas y tobas de finales del Eoceno (TeA2, TeR2). Consiste de una secuencia potente de lavas porfídicas andesíticas, que subyacen en forma concordante a una unidad riolítica (37.9 Ma) de espesor moderado (MacDowell y Mauger, 1994). Aflora en la porción centro meridional de la Sierra del Gallego.

Keller et al. (1982) la definen como Andesita Rancho El Ágate, que consiste de al menos 12 flujos individuales de andesitas de color gris oscuro a rojizo-púrpura o café, textura glomeroporfirítica con fenocristales de oligoclasa en una matriz de grano fino. Los flujos exhiben una estructura columnar muy marcada y amígdalas rellenas de calcedonia secundaria. El espesor conjunto de esta Formación es de 300 metros.

Otra secuencia volcánica que se agrupa a esta unidad, es la Riolita El Gallego, que consiste de dos flujos lávicos de composición riolítica de espesor uniforme y gran extensión, que varía de café-rojizo a gris claro. Contiene 50% de fenocristales de oligoclasa, sanidino y augita, en una matriz desvitrificada. Presenta estructura columnar y un espesor cercano a 140 metros. La datación por el método de K-Ar exhibe le confiere una edad de 37.9 ± 0.8 Ma (Keller et al. 1982).

De acuerdo con Keller et al. (1982) las características de la Riolita El Gallego indican que un flujo de cenizas puede ser una mejor definición que un flujo lávico para esta formación. Otras formaciones que están incluidas dentro de esta unidad son la Riolita Mestreño, Riolita Agua Nueva y la Riolita Carneros, que afloran en la Sierra del Gallego.

Tobas oligocénicas (ToTR-Ig). Se trata de una unidad de tobas vítrea de color gris claro, con fenocristales de sanidino, principalmente; además, líticos derivados de rocas máficas, cuarzo, anfíboles, plagioclasa y biotita. Sobreyace a aglomerados y a grandes bloques de riolitas, lavas máficas alteradas y flujos piroclásticos pobremente soldados. Aflora en la Sierra El Gallego, en las sierras del norte del área y en la Sierra Tinaja Lisa.

Andesitas basálticas del Oligoceno (ToB). Son flujos basálticos andesíticos y riolitas que afloran en la parte media de la Sierra del Gallego y entre esta estructura y la Sierra Tinaja Lisa. Estos flujos de andesitas basálticos, tienen una edad de 29.4 Ma. La relación basalto-riolita no es homogénea dentro del área, pero predominan las rocas de composición máfica. Las andesitas basálticas contienen, 10-15% de fenocristales de olivino (forsterita 60%- fayalita 40%), en una matriz intergranular de 55-65% plagioclasa (albita 40%- anortita 60%) y 8-12% de clinopiroxeno (enstatita). Los flujos félsicos pueden variar de alto a bajo contenido en fenocristales.

Rocas ígneas intrusivas del Oligoceno (ToTq, ToLa). Existe un emplazamiento importante de rocas intrusivas, formando cuerpos traquíticos y latíticos. La traquita es una roca de color gris rojizo, con variaciones a tonos más oscuros y verdosos.

El emplazamiento de este cuerpo ígneo sucedió durante el Oligoceno, pero sus efectos iniciales son desde el Eoceno inferior a medio. Sus mejores afloramientos, se localizan en las sierras septentrionales del área.

Conglomerado polimíctico del Mioceno-Plioceno (TmCgp, TplCgp). Se trata de depósitos conglomeráticos, con diferente grado de cementación. Se constituyen por fragmentos redondeados de rocas preexistentes, predominan las gravas calcáreas y fragmentos de rocas ígneas. El medio ambiente de depósitos se considera fluvio lacustre y en base a las correlaciones, se le atribuye una edad Mioceno-Plioceno.

Debido a las condiciones de depositación, existen variaciones granulométricas por cambios de facies lateral y verticalmente. Sus afloramientos principales son los que se localizan al noroccidente del Poblado El Sueco, partes bajas que rodean a la Sierra Ponce y al oriente de la Sierra El Nopal.

Basalto (Tb).

Roca volcánica de color café y gris oscuro, con textura porfídica sobresaliendo cristales blancos de feldespatos, se presenta diaclasamiento y fracturamiento. Se encuentra sobre ignimbritas cristalinas y sobre un conglomerado brechoide estratificado, el cual se considera un remanente de los sedimentos continentales ya descritos.

Cuaternario

Conglomerado polimíctico del Pleistoceno (QplCgp).

Consiste de un conglomerado, polimíctico (rocas ígneas y calcáreas), con grado de cementación variable. Presentan granulometría variable. Su origen es de un ambiente fluvio-lacustre. De edad reciente (Holoceno).

Depósitos de limos y arenas recientes (Qholm-ar).

Esta unidad se localiza principalmente al pie de las sierras que se localizan al norte del área. Se trata de sedimentos no consolidados, que incluyen limos y arenas, en ocasiones con matriz arcillosa. La composición de los clastos es volcánica, de forma subangulosa a subredondeada.

Depósitos lacustres recientes (Qhola).

Incluye a los depósitos de grano fino que se localizan en la parte central del Valle de Tarabillas, también denominados depósitos de playa.

Los limos y arcillas que componen esta unidad, se asocian a depósitos lacustres formados durante los periodos como el actual, en donde existieron condiciones de cuenca endorreica y que, de acuerdo con las condiciones climáticas, fue posible la formación de lagos interiores asociados a las menores elevaciones topográficas.

Depósitos aluviales recientes (Qhoal).

Consiste de material de granulometría variada que oscila entre clastos del tamaño de la grava, arenas y limos, principalmente. Sobreyacen a sedimentos del Terciario superior, originados cuando se inició la formación de la fosa tectónica y a rocas volcánicas que conforman la zona noroccidental del subsuelo del valle. De acuerdo a información de pozos y barrenos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizados en la Central Termoeléctrica de Samalayuca, el espesor varía de 60 a 80 m y con los sondeos eléctricos verticales, se detecta una profundidad máxima de 130 m. Los rasgos fisiográficos, hacen suponer la presencia de sedimentos continentales depositados en las cuencas cerradas o valles. Estos depósitos de bolsón tienen 3 facies que son: conglomerática, arenosa y limolítica.

4.2 Geología estructural

En un contexto tectónico-global, el área se localizó en el límite de dos estructuras jurásicas, denominadas península de Aldama, y cuenca de Chihuahua. A partir de imágenes de satélite, COREMI (2002) afirma que, en la cuenca de Chihuahua, las estructuras son predominantemente lineales, con orientación NW-SE; mientras que en la plataforma de Aldama, se incluye tanto complejos tectónicos circulares, como rasgos lineales en dirección NW-SE; lo cual respalda que la actividad volcánica más importante tuvo lugar sobre la plataforma de Aldama.

Dentro de los rasgos tectónicos circulares se pueden citar a las sierras La Mojina, de forma elíptica y Los Arados; además, se observan otra serie de estructuras circulares que corresponden a aparatos volcánicos, los cuales pueden constituir calderas, domos o centros de emisión; así como una serie de fallamientos normales que originaron fosas y pilares alineados predominantemente norte-sur.

La Sierra de Los Fierros (al noreste de la zona), es una de las estructuras más conspicuas del mesozoico en la región. Corresponde a la parte media de un largo lineamiento estructural, desde la región de Ciudad Juárez hasta los límites con la capital del estado, lo que manifiesta la existencia de una cuenca marina jurásica de dimensiones considerables.

El lineamiento que guardan estas estructuras hacia el noroeste con ligeras variaciones sugiere el posible contorno de la cuenca. Las características estructurales de esta depresión, son de una amplia faja de pliegues de dirección noroeste que se extiende desde Ojinaga hasta la ciudad de Chihuahua.

Así, de los diversos eventos tectónicos-estructurales que afectaron a la región, se tiene como uno de los más importantes, el producido por la revolución Laramide, que produjo plegamientos y fallas inversas de dirección norte a noroeste, en los sedimentos de la Cuenca Mesozoica de Chihuahua, produciendo el Cinturón Plegado, que se extiende entre Ojinaga y Aldama en Chihuahua (Hennings, 1994). Este Cinturón Plegado, es la continuación del Cinturón Plegado Cordillerano de Norte América.

En cuanto a los sistemas de fallas, existen dos sistemas principales, el sistema más importante es de tipo normal y se considera pene-contemporáneo al plegamiento de las formaciones marinas cretácicas. El segundo sistema de fallas, son de tipo transversal, posteriores al plegamiento de la secuencia estratigráfica marina, que produjeron corrimiento de las formaciones.

El intermitente vulcanismo de piroclásticos finos durante el Terciario, acompañado el Eoceno Medio de ligeros movimientos epirogénicos las rocas sufrieron suaves inclinaciones hacia el SW. El emplazamiento de un cuerpo ígneo intrusivo, ocasionó mayor intensidad en las discordancias angulares que cubrieron el área. Para conocer las relaciones estratigráficas y estructurales de las unidades geológicas de la zona se elaboraron tres secciones geológicas, una orientada de manera longitudinal al valle en dirección N-S (Sección B), y dos secciones transversales (Secciones A y C).

La sección A-A' (figura 3) va desde la zona Sureste del acuífero de Villa Ahumada hacia la parte norte del acuífero. Esta sección tiene la finalidad de conocer la posible conexión en el subsuelo entre los acuíferos de Tarabillas y Villa Ahumada. En esta sección se puede observar la estructura de graben que conforma el valle de Tarabillas.

La unidad geológica más profunda está conformada por las rocas calizas, que dependiendo del grado de fracturamiento y karstificación pudieran conformar conductos para la comunicación regional del agua subterránea. Sobreyaciendo a esta unidad se encuentran diferentes unidades volcánicas conformadas por tobas riolítico-ignimbríticas y basaltos.

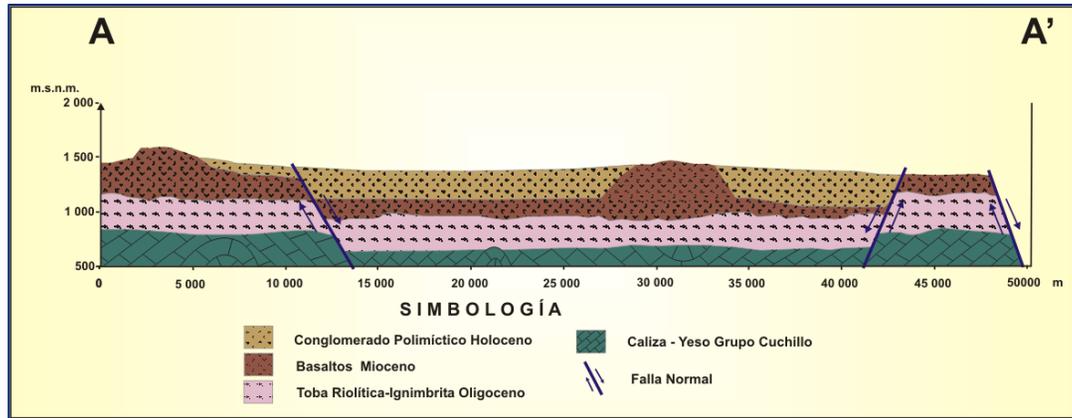


Figura 3. Sección geológica esquemática A-A'

En la porción más somera se encuentran depósitos aluviales, los cuales varían de material de granulometría más grueso hacia las zonas de pie de montaña hasta material fino (arcilloso) hacia el centro del valle. Estos depósitos son los que conforman el acuífero que se explota actualmente, con un espesor estimado en 400 m.

La sección B-B' está orientada de manera longitudinal al valle de Tarabillas con una dirección prácticamente S-N (figura 4). En ella se puede observar cómo es la disposición de calizas, material volcánico y material aluvial en el centro del graben.

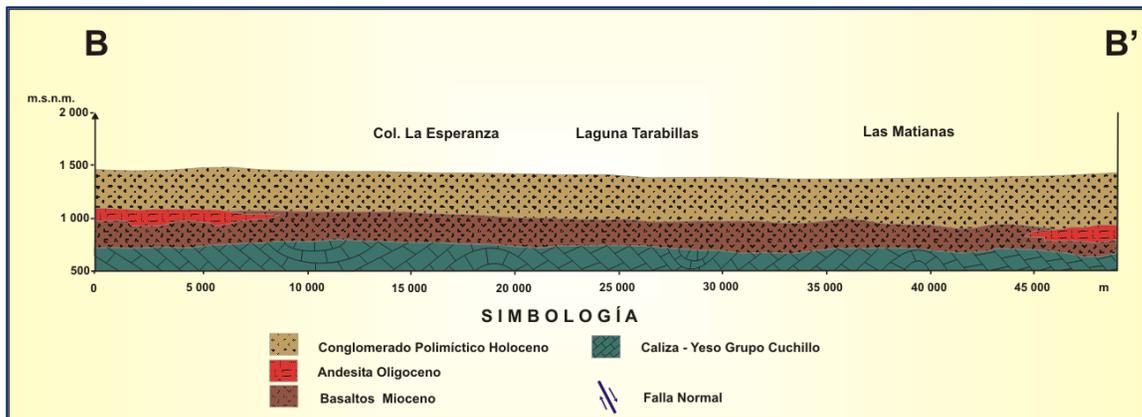


Figura 4. Sección geológica esquemática B-B'

Finalmente, la Sección C-C', ubicada en la porción sur del valle de Tarabillas muestra el afloramiento de rocas calizas en la porción sureste de la zona (figura 5). La zona de transición entre la parte elevada y el valle en esta porción no muestra evidencias del fallamiento normal y de ahí que se interprete como un plegamiento de la secuencia calcárea con buzamiento hacia el occidente.

Esta es una de las evidencias directas que se tienen para interpretar la posible secuencia de unidades que conforman el subsuelo de la región.

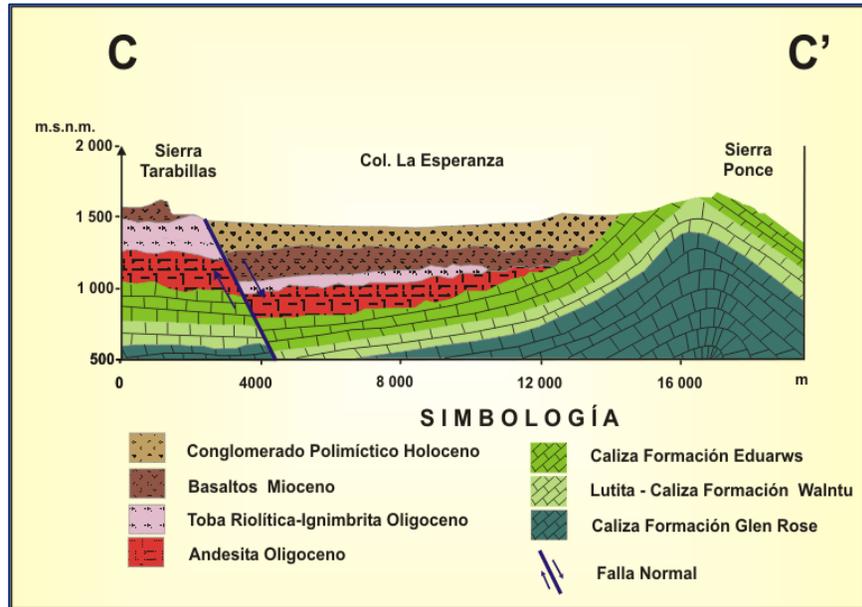


Figura 5. Sección geológica esquemática C-C'

4.3. Geología del subsuelo

En el estudio realizado por el IMTA en el 2006, se realizó un estudio de geofísica, en dos campañas, el cual incluye 65 sondeos por Transitorio Electromagnético en el dominio del Tiempo (TEM), con la finalidad de evaluar las características hidrogeológicas del subsuelo.

Los sitios estudiados se programaron en donde se pretende conocer su comportamiento georresistivo a profundidades del orden de los 600 m y conocer cómo se distribuyen las posibles zonas saturadas.

Las características litológicas de las unidades estratigráficas, la interpretación hidrogeomorfológica y la hidrología superficial, se utilizaron para definir el comportamiento de los materiales por donde circula el agua subterránea. A partir de este análisis, fue posible distinguir dos medios principales: i) medio poroso y ii) medio fracturado.

El medio poroso involucra a los materiales no consolidados del Terciario y Cuaternario, que se alojan en la fosa tectónica del Valle de Tarabillas.

Estas son, de la más antigua a la más reciente: i) Conglomerados y areniscas de la Formación Pozos (K?Tpa?Cgp) ii) Conglomerado polimíctico del Mioceno-Plioceno (TmCgp, TplCgp), iii) Conglomerado polimíctico del Pleistoceno (QplCgp), iv) Depósitos de limos y arenas recientes (Qholm-ar), v) Depósitos lacustres recientes (Qhola), y vi) Depósitos aluviales recientes (Qhoal).

Bien se sabe que la permeabilidad de las unidades geológicas, está en función de su distribución granulométrica. Los Depósitos lacustres recientes (Qhola) presentan los menores valores de permeabilidad, mientras que los depósitos aluviales (Qhoal) asociados a los depósitos modernos sobre los piedemonte y escorrentías intermitentes, exhiben los mayores. Por las características de sedimentación de estas unidades (deposición en estratos aproximadamente horizontales en la fosa tectónica), se consideran anisótropas, donde la conductividad hidráulica horizontal es mayor que la vertical.

La mayoría de los pozos están perforados en este medio poroso. Su espesor es variable, oscilando desde unos cuantos metros en las zonas adyacentes a los pilares tectónicos que delimitan al Valle de Tarabillas, hasta varios cientos de metros, en las porciones más profundas de la fosa tectónica.

Medio fracturado. Las rocas volcánicas cenozoicas (lavas, tobas e ignimbritas), (TeA1, TeR1, TeTR-Ig, TeA2, TeR2, ToTR-Ig, ToB) e intrusivos (ToTq y ToLa), que afloran en el área, además de las rocas calcáreas del Cretácico (formaciones Walnut 'KaLuCz1', Edwards 'KaCz3', Kiamichi 'KaceLu-Cz2', Georgetown 'KaCz4', Del Río (KceLu-Cz) y Buda 'KceCz'), constituyen el medio fracturado.

Presentan gran heterogeneidad en la distribución de sus propiedades hidráulicas, debido a que están en función del grado de fracturamiento. El sentido y dirección del fracturamiento, ocasiona que la conductividad hidráulica vertical pueda ser mayor que en el sentido horizontal.

El espesor conjunto de la secuencia volcánica no se conoce con exactitud, pero de acuerdo con las estimaciones realizadas por Mauger (1981) puede alcanzar varios kilómetros. Sin embargo, como la densidad del fracturamiento tiende a disminuir a profundidad, así como la abertura de las fracturas, el espesor del medio fracturado en donde la velocidad del agua subterránea es significativa (desde el punto de vista hidrogeológico), puede ser menor que el espesor total de la secuencia volcánica.

En cuanto a las rocas calcáreas del Cretácico, no existe información al respecto de su comportamiento hidráulico. Por sus características litológicas y estructuras, apreciables en superficie (zonas de fracturamiento y rasgos de disolución), se puede inferir que a profundidad la presencia de fracturas y/o aberturas secundarias, cuya abertura se incrementa por la disolución del agua subterránea, constituyen un medio kárstico, con un potencial de agua, tal vez importante, con la limitación que le pueda establecer la calidad del agua.

Respecto a la presencia de tobas intercaladas en la secuencia volcánica, estas ofrecen la posibilidad de la existencia de un tercer tipo de medio, de doble porosidad con permeabilidad combinada intergranular y de fracturas. Se requiere de mayor información respecto a la geología del subsuelo para identificar con mayor detalle, la importancia de este tipo de medio en la ocurrencia del agua subterránea y su relación con el comportamiento hidráulico de los pozos.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El sistema-acuífero es heterogéneo debido a que incluye varios tipos de litología, tanto en el sentido vertical como horizontal.

El material granular sobreyace a la roca volcánica fracturada, aunque en algunas regiones la información de la geología del subsuelo, indica que por efecto de los desplazamientos verticales originados por las fallas que limitan la fosa tectónica, el material granular está en contacto lateral con la roca volcánica fracturada, así como con las rocas calcáreas cársticas del Mesozoico.

Las aguas del subsuelo del Valle de Tarabillas, según el modelo conceptual de flujo hidrodinámico (figura 6), presentan un comportamiento en condiciones casi naturales, con un equilibrio entre los volúmenes de entrada y salida del sistema, debido al incipiente desarrollo agrícola.

Esto significa, que actualmente se tiene un sistema físico en funcionamiento natural o de predesarrollo, que mantiene elementos originales importantes de analizar, antes de que manifiesten modificaciones o alteraciones, por actividades antropogénicas.

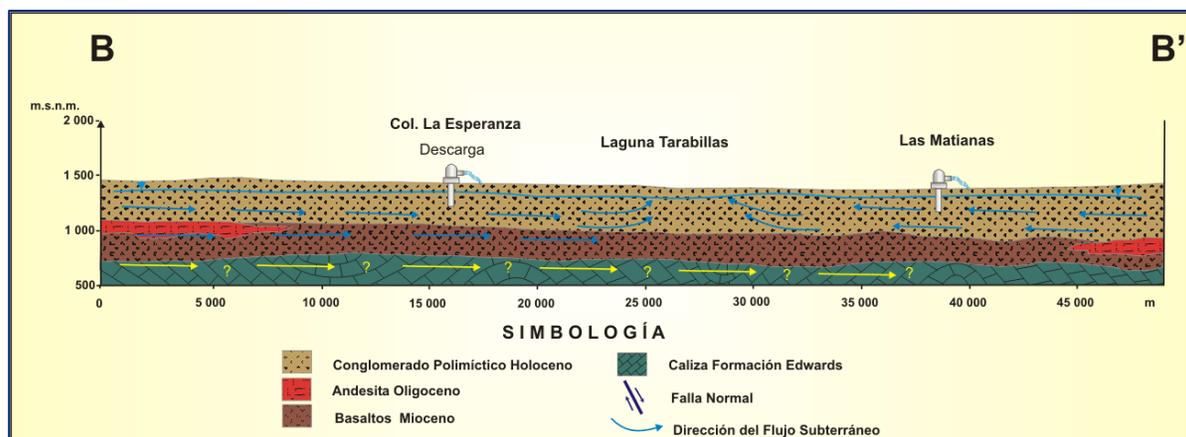


Figura 6. Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico

5.2 Parámetros hidráulicos.

Como parte de las actividades de campo llevadas a cabo durante el estudio realizado en el 2006, se realizaron 10 pruebas de bombeo a caudal variable.

La información geológica e hidroestratigráfica analizada, señala en la zona las condiciones hidráulicas corresponden a un sistema-acuífero de **tipo libre**.

Los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo por diferentes métodos muestran valores de conductividad hidráulica que van de los 0.2 a 30 m/d para los métodos analíticos. Tabla 2. Estos valores son representativos de limos a arenas limpias. El valor promedio de las pruebas fue de 3.9 m/d.

Tabla 2. Resumen de resultados de la conductividad hidráulica (m/d)

| Pozo | Predio | X-UTM | Y-UTM | Prof. (m) | Métodos analíticos | | | | Método numérico |
|--------|-----------|--------|---------|-----------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| | | | | | Neuman | Escalonado de Theis | Escalonado de Cooper-Jacob | Recuperación de Theis | Rushton y Rathod |
| | | | | | Conductividad hidráulica (m/d) | | | | |
| 2 | LOTE 2 | 384021 | 3308572 | 220 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 1.5 |
| 9 | LOTE 9 | 389939 | 3307671 | 140 | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 2.7 |
| 19 | LOTE 19 | 383177 | 3309925 | 180 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.3 | 3.7 |
| 24 | LOTE 24 | 387298 | 3309339 | 182 | 30.0 | 21.2 | 22.2 | 21.4 | 60.0 |
| 36 1/2 | LOTE 36.5 | 382787 | 3310552 | 190 | 1.9 | 0.8 | 0.5 | 1.2 | 4.4 |
| 49 | LOTE 49 | 386480 | 3311956 | 150 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 1.4 |
| 85 | LOTE 85 | 385787 | 3315152 | 200 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | --- |
| 97 | LOTE 97 | 388181 | 3316782 | 200 | 1.4 | 1.8 | 3.0 | 3.0 | 2.8 |
| 102 | LOTE 102 | 388212 | 3318315 | 200 | 2.3 | 2.3 | 1.7 | 1.7 | 1.6 |
| 109 | LOTE 109 | 386680 | 3319265 | 200 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | --- |

5.3 Piezometría.

No existe información piezométrica histórica, los primeros datos, los obtiene CNA, en noviembre del 2005. Las medidas de la profundidad al nivel estático, se obtuvieron durante el levantamiento del censo de fuentes de aguas subterráneas, en aquellos pozos que no estuvieran operando y fueran sondeables. Se obtuvieron 86 lecturas, que es un hecho histórico, porque serán punto de partida y de referencia para posteriores estudios. De este grupo de pozos con medición de niveles, se seleccionaron 39 para la nivelación de sus brocales, de los cuales la mayoría se utilizaron como pozos-piloto en el análisis piezométrico de las aguas subterráneas. A partir de esa información, en los siguientes apartados se hace referencia al comportamiento de la profundidad y elevación del nivel estático.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad a los niveles del agua subterránea para el año de 2005, muestra profundidades máximas de 130 metros al suroccidente del acuífero y mínimas de 30 metros hacia la Laguna de Tarabillas. La colonia La Esperanza presenta la mayor concentración de pozos, donde se registraron profundidades al nivel del agua subterránea de 20 a 55 m. Figura 7.

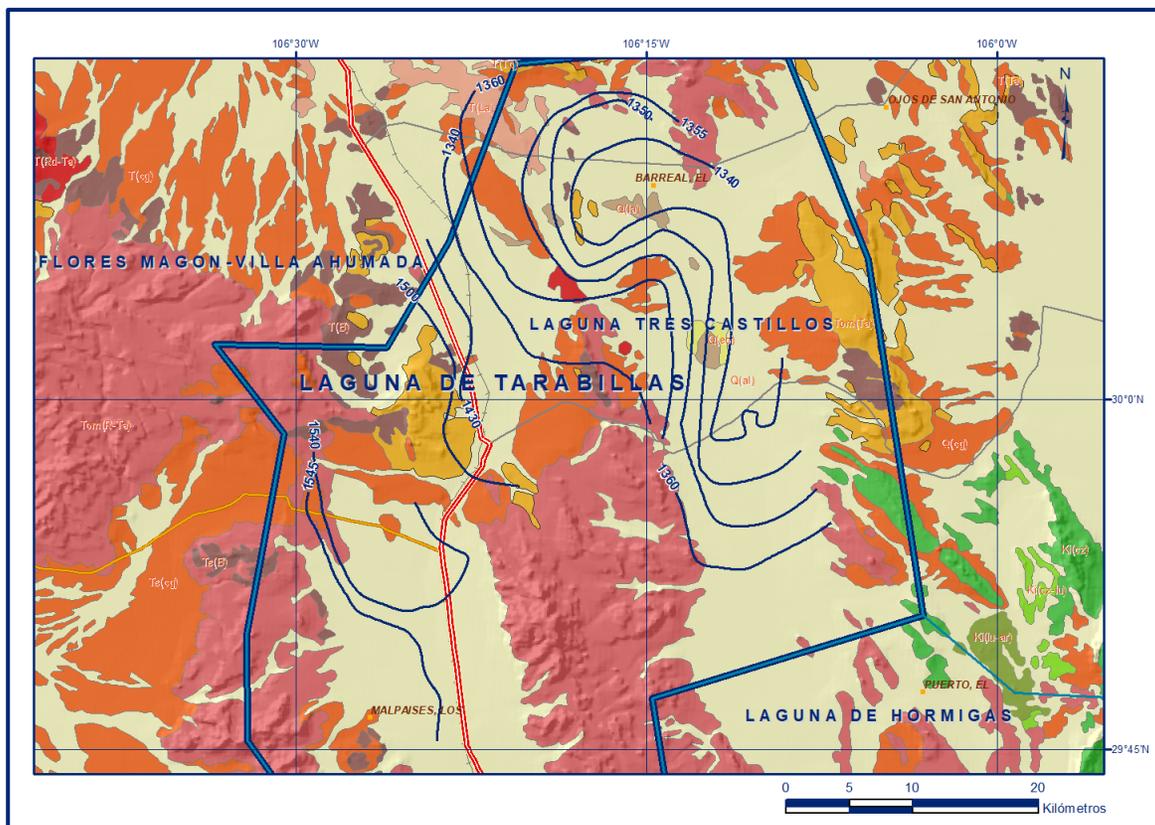


Figura 8. Elevación del nivel estático en msnm (2005)

5.4.3 Evolución del nivel estático

El poco desarrollo agrícola que demanda una pequeña cantidad de aguas subterráneas ($3.3 \text{ hm}^3/\text{a}$) comparada con la recarga ($36.4 \text{ hm}^3/\text{a}$), permite resaltar que el acuífero Laguna de Tarabillas, presenta una condición de subexplotación, en el que se mantiene el equilibrio entre los volúmenes de entrada y salida del sistema, sin alterar el volumen almacenado en su interior.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2006, la composición química de los recursos hídricos del subsuelo se investigó por medio de una etapa de muestreo, que se llevó a cabo durante el mes de noviembre del 2005 e incluyó la colecta de muestras, que incluyeron agua subterránea extraída a partir de 25 pozos. El agua subterránea en el sistema-acuífero Tarabillas en general manifiesta baja salinidad, en las muestras colectadas el promedio es del orden de 280 mg/l de salinidad, valor que es muy bajo y que refleja, entre otras cosas, la naturaleza volcánica de los materiales geológicos con los que está en contacto.

Las menores concentraciones de salinidad (menores a 250 mg/l) se identifican en la región sur de la zona donde se encuentran la mayoría de los aprovechamientos en el sistema-acuífero Tarabillas; los valores se incrementan hacia el norte donde predominan valores entre 300 y 400 mg/l. Por otro lado, las concentraciones bajas de salinidad coinciden con valores muy bajos de cloruro (del orden de 5 mg/l), que se incrementan hacia el norte.

La composición del agua subterránea refleja de manera importante su interacción con los minerales de las rocas volcánicas. Adicionalmente, las bajas concentraciones de Cl (16 mg/l en promedio), SO₄ (38.4 mg/l) y NO₃ (16.6 mg/l), indican que las fuentes de contaminación difusa que existen en la región y que se identifican con los retornos de riego, no han alcanzado el agua subterránea.

Con relación a las familias de agua subterránea a través del diagrama de Piper señala que predominan las familias HCO₃-Mix y HCO₃-Na, situación que comprueba que el origen de los solutos en el agua subterránea es precisamente las rocas volcánicas del Terciario que afloran en la región de interés.

La distribución espacial de las familias de agua identificadas, en el agua de menor salinidad se identifica la familia HCO₃-Mix, que conforme se mueve a lo largo de la dirección de flujo evoluciona a la HCO₃-Na. Otras familias identificadas son la HCO₃-Ca que también representa agua de baja salinidad y la Mix-Na que representa agua subterránea que manifiesta el impacto de contaminación difusa.

La gran mayoría de las muestras colectadas, representan agua que no es utilizada para consumo humano; sin embargo, para tener un parámetro químico de referencia del agua caracterizada, en esta ocasión se comparan los resultados analíticos de las muestras colectadas, con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, que controla la calidad del agua para el consumo y uso humano.

Adicionalmente, como en la región de interés predomina el uso agrícola a partir de fuentes del subsuelo, se realiza un análisis de calidad del agua que considera su utilidad para la irrigación de cultivos.

El análisis de la información disponible sugiere que en términos generales el agua es de baja salinidad por lo que en cuanto a elementos mayores se refiere, básicamente no presenta problemas de calidad para uso y consumo humano, únicamente elemento traza como el F, Fe y Cd presentan en algunas muestras concentraciones superiores al límite permisible en agua para uso y consumo humano.

Con respecto a los elementos menores como el NO_3 , únicamente en un punto se rebasa el límite permisible en la NOM-127.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo de captaciones de aguas subterráneas realizado durante el 2006, existentes en el Valle de Tarabillas, señala la existencia de 142 pozos, de los cuales 117 se localizan en la Colonia La Esperanza, 22 en ranchos del norte del Valle de Tarabillas y 3 en el Ejido San Lorencito. De los 117 sitios censados en la Col. La Esperanza, 30 corresponden a sitios con proyecto de perforación, es decir, no existe el pozo o está en proceso de construcción.

El grueso de los aprovechamientos se ubica en el centro del valle, que es la zona agrícola de riego más importante y la de más afectación en cuanto a disminución de los niveles del agua. La profundidad de los pozos es variable, pues oscilan entre 50 m hasta 240 m y la profundidad a los niveles estáticos entre 20 y 70 m.

En la Colonia La Esperanza, se contabilizaron un total de 87 pozos en propiedad privada, con profundidades de perforación total en el intervalo de 120 a 240 m y diámetros de perforación y ademe variables entre 6" y 25" y 16" y 22", respectivamente. Aproximadamente, el 94% del total de los pozos, extraen agua que se destina a la actividad agrícola. Los restantes son para uso doméstico. Por otra parte, en la zona de rancherías al norte del Valle de Tarabillas, se registraron 25 aprovechamientos, de los cuales 22 son de propiedad privada (específicamente, de los propietarios de 6 ranchos) y 3 que pertenecen a la comunidad del Ejido San Lorencito. Las profundidades totales de estas obras, son generalmente de 150 ó 200 m, con diámetros de perforación y ademe de 6" a 20".

A diferencia de la zona anterior, aquí la principal actividad es la ganadería, la cual utiliza el 40% de la infraestructura hidráulica, mientras que el 28% de los pozos son de uso mixto (ganadero-doméstico), en tercer lugar, se sitúa la actividad agrícola con el 16% de los pozos de aguas subterráneas.

En cuanto a las condiciones físicas actuales de los pozos, es importante señalar que la mayoría no cuenta con filtro de grava y un número importante sin cementado. De los pozos que están equipados, generalmente la bomba es de tipo centrífuga y en menor proporción son bombas sumergibles. También se registraron algunos papalotes.

El volumen de extracción estimado por las 93 captaciones en operación, es de 3.3 hm³ anuales, de los cuales el 77% del agua extraída del acuífero está destinada al uso agrícola, el 12% a uso doméstico y el 11% restante, al uso 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 como sigue:

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

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:

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

7.1 Entradas

La recarga total (R) al acuífero Laguna de Tarabillas está integrada básicamente por las entradas subterráneas (Eh) y la recarga vertical por lluvia (Rv).

7.1.1 Recarga natural

Esta recarga está constituida por recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas de pie de monte y por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle.

7.1.2 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Para el caso del acuífero Laguna de Tarabillas, se tiene un área de infiltración directa de 1,156 km², una precipitación media de 355 mm y un coeficiente de infiltración de 0.03, la infiltración directa por lluvia es de 1,156 km² (0.355 m/año) (0.03) = **11.8 hm³/año**.

7.1.3 Entradas subterráneas horizontales (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos.

Para su cálculo se utilizó la configuración de las curvas de igual elevación del nivel estático correspondiente al 2005, mostrada en la figura No. 8. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **24.6 hm³/año**.

$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T: Transmisividad (m²/s) en el canal de flujo = $k * b$

La configuración de elevación del nivel de saturación y la red de flujo para el cálculo de las entradas subterráneas se calcularon considerando la profundidad al nivel de saturación medida por el IMTA, 2005 para la porción oriental del acuífero, y por Consultores y Constructores del Norte, 2005 para la porción occidental del acuífero. Los valores de conductividad hidráulica fueron tomados de los valores promedio de la interpretación de las pruebas de bombeo del estudio del IMTA, 2005 y corresponden con los materiales geológicos identificados.

Los espesores saturados utilizados se calcularon considerando la profundidad al nivel de saturación medida por el IMTA, 2005 para la porción oriental del acuífero y por Consultores y Constructores del Norte 2005, para la porción occidental del acuífero y de acuerdo con la profundidad total del pozo indicada en el censo de aprovechamientos.

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero las constituyen, la extracción por bombeo determinado por los estudios técnicos realizados, cuantificados en $3.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, las salidas naturales por flujo subterráneo conjuntamente con la evapotranspiración, se estimaron en $33.1 \text{ hm}^3/\text{año}$, lo que hace un total de descargas del acuífero de 36.4 hm^3 anuales. Con la información disponible no es posible determinar por separado las componentes de salidas naturales.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

La extracción de agua subterránea en el área ha variado a través del tiempo y se consideró el volumen registrado e inscrito en el REPGA por considerarse más válido en este caso que el obtenido en la hidrometría realizada por el IMTA, 2005, se cuantifica en **$3.3 \text{ hm}^3/\text{año}$** , con fecha de corte 31 de mayo de 2005.

7.2.2 Salidas subterráneas (Sh)

Las salidas subterráneas conjuntamente con la evapotranspiración, resolviendo la ecuación 2, se estimaron en **$33.1 \text{ hm}^3/\text{año}$** , lo que hace un total de descargas del acuífero de 36.4 millones de m^3 anuales. Con la información disponible no es posible determinar por separado las componentes de salidas naturales.

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Aunque no en toda el área de balance los niveles estáticos son inferiores a los 10 m de profundidad, definidos como el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, su valor será despejado de la ecuación de balance.

$$Eh + Rv - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(s) \quad \text{----- (1)}$$

De esta manera:

$$ETR + Sh = Eh + Rv - B - \Delta V(s) \quad \text{----- (2)}$$

7.3 Cambio de almacenamiento (Δv_s)

Hasta ahora, no existe registro histórico sobre el comportamiento de los niveles del agua subterránea.

Los primeros datos se obtienen en noviembre de 2005, sin embargo, considerando los valores de recarga del acuífero y los bajos volúmenes de extracción se asume que los niveles del agua subterránea se han mantenido sin cambio.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(s) = 0.0$

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la evapotranspiración conjuntamente con las salidas horizontales, mediante la expresión (2):

$$ETR + Sh = Eh + Rv - B - \Delta V(s) \quad \text{----- (2)}$$

$$ETR + Sh = 24.1 + 12.3 - 3.3 - 0.0$$

$$ETR + Sh = 33.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Las salidas naturales integradas por la evapotranspiración y las salidas subterráneas se consideraron como incógnitas debido a la falta de información suficiente para estimarla.

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:

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

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 **36.4 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el acuífero Laguna de Tarabillas, en el estado de Chiapas, existe una descarga natural comprometida de **0.0 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 (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 **299,762,262 m³** anuales, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 36.4 - 0.0 - 299.762262 \\ \text{DMA} &= -263.362262 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **263,362,262 m³ anuales**.