CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO LA PAILA (0509), ESTADO DE COAHUILA

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1. Localización 2
1.2. Situación Administrativa del acuífero 3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 7
3.1. Provincia fisiográfica 7
3.2. Clima 7
3.3. Hidrografía 8
3.4. Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 9
4.1. Estratigrafía 9
4.2. Geología Estructural 14
4.3. Geología del Subsuelo 15
5. HIDROGEOLOGÍA 17
5.1. Tipo de acuífero 17
5.2. Parámetros hidráulicos 18
5.3. Piezometría 18
5.4. Comportamiento hidráulico 19
5.4.1. Profundidad al nivel estático 19
5.4.2. Elevación del nivel estático 20
5.4.3. Evolución del nivel estático 20
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 24
7.1. Entradas 24
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 24
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 25
7.1.3. Recarga incidental (Ri) 26
7.2. Salidas 26
7.2.1. Bombeo (B) 27
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 27
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS) 27
8. DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA 28
8.1. Recarga total media anual (R) 29
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 29
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 29
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 30
9. BIBLIOGRAFÍA 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-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas. Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero La Paila, definido con la clave 0509 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo oriente de la Región Lagunera, porción sur del estado de Coahuila. Limita al norte con los acuíferos del Valle de San Marcos y El Hundido, al sur con General Cepeda-Sauceda y Saltillo Sur, al este con los acuíferos Paredón y General Cepeda Sauceda, y hacia el oeste con el acuífero Principal-Región Lagunera, todos ellos del estado de Coahuila. Se ubica entre las coordenadas 25° 25' y 26° 20' de latitud norte, y 101° 30' y 102° 55' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 6,949 km^2 (figura 1).

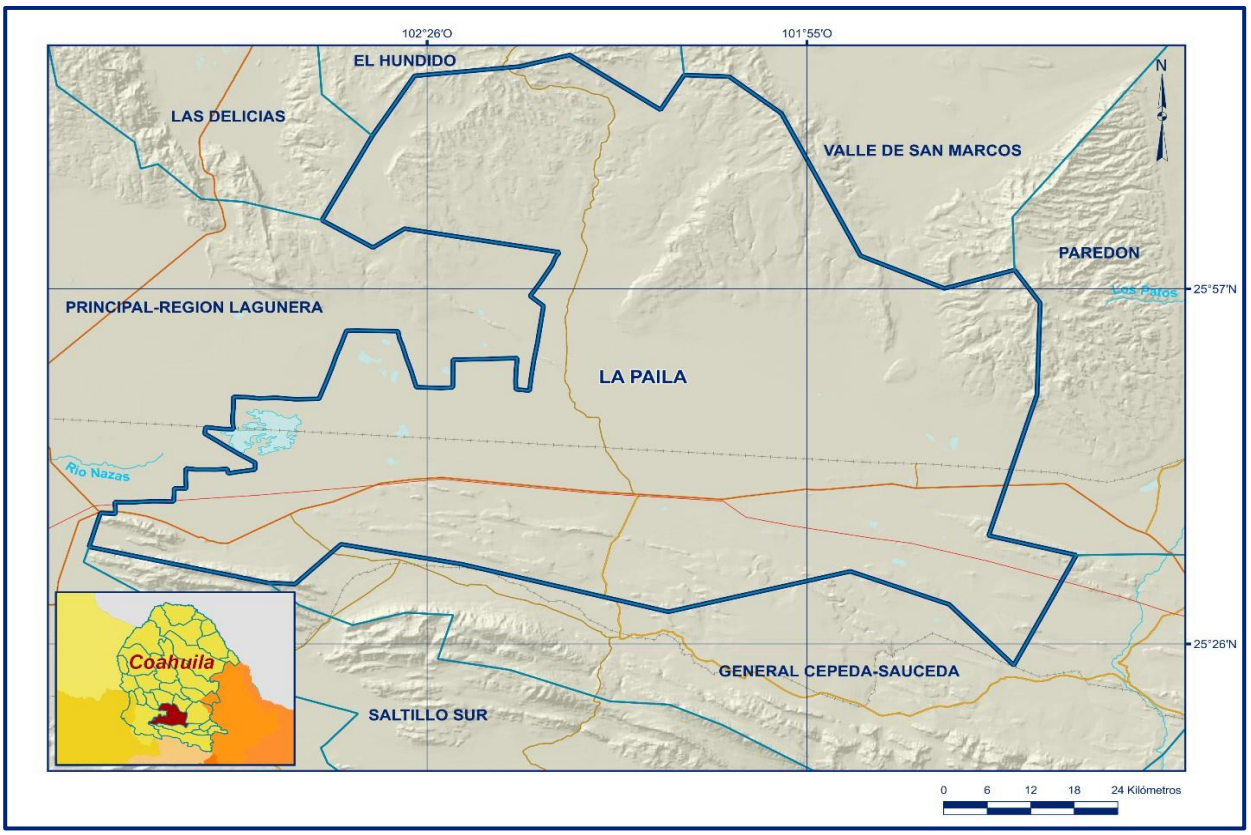


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, comprende casi en su totalidad el municipio de Parras, parcialmente el de General Cepeda y en menor proporción los municipios de San Pedro, Cuatrociénegas y Ramos Arizpe, en el estado de Coahuila.

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

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero La Paila pertenece al Organismo de Cuenca VII "Cuencas Centrales del Norte" y al Consejo de Cuenca "Nazas-Aguanaval", instalado el 1° de diciembre de 1998. Únicamente una pequeña porción al norte de su territorio se encuentra vedado, 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 el 17 de abril de 1965. Este decreto establece veda tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 0509 LA PAILA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	33	14.2	25	34	36.3	
2	102	37	0.6	25	31	6.9	
3	102	39	12.8	25	31	12.8	
4	102	53	55.9	25	34	22.5	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE MUNICIPAL
5	102	15	36.4	25	59	47.0	
6	102	15	17.7	26	0	12.4	
7	102	28	0.9	26	2	16.7	
8	102	30	36.2	26	0	37.1	
9	102	34	48.3	26	3	1.1	
10	102	30	39.6	26	10	24.8	
11	102	27	12.0	26	15	40.4	
12	102	18	32.3	26	16	29.6	
13	102	14	26.7	26	17	30.1	
14	102	6	59.7	26	12	41.9	
15	102	5	3.2	26	15	44.8	
16	102	1	21.0	26	15	36.2	
17	101	57	4.3	26	12	23.5	
18	101	50	34.0	25	59	54.1	
19	101	43	40.5	25	57	2.2	
20	101	37	55.2	25	58	39.3	
21	101	35	48.8	25	55	45.5	
22	101	36	4.3	25	47	43.9	
23	101	40	2.3	25	35	21.9	
24	101	32	50.5	25	33	38.8	
25	101	37	58.9	25	24	0.0	
26	101	43	17.0	25	29	19.7	
27	101	51	24.0	25	32	13.6	
28	102	6	21.2	25	28	40.9	
29	102	23	18.5	25	32	51.1	
1	102	33	14.2	25	34	36.3	

Sobre el resto del acuífero no rige ningún decreto para la extracción del agua subterránea. Sin embargo, esta porción no vedada se encuentra sujeta a las disposiciones del *"ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 18 acuíferos que se indican"*, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, se prohíbe la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

El Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) está en proceso de conformación. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

La zona que comprende el acuífero La Paila, ha sido objeto de diversos estudios de carácter geohidrológico, destacando los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DEL VALLE DE LA PAILA, EN 1973. Realizado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. Destaca entre sus objetivos cuantificar la recarga del agua subterránea y su relación con las extracciones. Incluye actividades de campo como censo de aprovechamientos subterráneos, nivelación de los brocales de pozos seleccionados, observaciones piezométricas y muestreo de aguas subterráneas. Concluye con las descripciones a detalle de la climatología regional, la hidrología superficial, geología, la interpretación geoquímica del agua subterránea, pruebas de bombeo, así como la dirección del flujo subterráneo de nivel regional.

ESTUDIO DE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: MONCLOVA, SALTILLO-RAMOS ARIZPE, ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS, CUATRO CIÉNEGAS-OCAMPO, LA PAILA Y DERRAMADERO, COAH., EN 1998. Realizado por la empresa Estudios y Proyectos de Agua y Tierra Rubriselva, S.A. de C.V. para la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua. Tuvo como objetivo principal establecer una red piloto de monitoreo confiable para la obtención de información piezométrica, que comprendió la toma de datos de niveles del agua subterránea para determinar las tendencias de su comportamiento hidrodinámico, con influencia natural o antropogénica. Como objetivo secundario estableció las bases para delimitar un marco de referencia desde el punto de vista hidrogeológico, que proyectara el efecto de los cambios que generarían los futuros desarrollos sobre las fuentes de agua subterránea y por tanto sobre su disponibilidad. Parte de las actividades realizadas consistieron en actualizar los datos climáticos, la hidrometría, aspectos de marco físico como la geomorfología regional y el modelo conceptual del acuífero, a partir de redes de flujo subterráneo. Concluye definiendo la condición geohidrológica en estado de equilibrio, además de recomendar continuar con las observaciones piezométricas, aforar los aprovechamientos para conocer la extracción real de captaciones subterráneas, realizar pruebas de bombeo y

nivelaciones de brocales, para completar las características hidráulicas del acuífero y elaborar redes de flujo subterráneo más detalladas y confiables, para fines de balance hidráulico subterráneo.

CENSO DE APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS EN EL ACUÍFERO LA PAILA, COAH., EN 2001. Realizado por Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Cuencas Centrales del Norte, Subgerencia Técnica. Los proyectos de aguas subterráneas dependientes de las Subgerencias Técnicas, Estado de Coahuila y Gerencia Regional Cuencas Centrales del Norte, realizaron en el año 2001, recorridos de campo como actividades para cumplir con el objetivo de actualizar el censo de aprovechamientos subterráneos. Concluye con la localización de 367 aprovechamientos, presentando los datos de niveles de agua subterránea en pozos susceptibles de sondear y donde se tomaron 68 muestras de agua para fines de análisis físico-químicos.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS DENOMINADOS: PRINCIPAL, ORIENTE AGUANAVAL, VICENTE SUÁREZ Y LA PAILA, REGIÓN LAGUNERA, ESTADOS DE COAHUILA Y DURANGO EN 2002. Realizado por la empresa Ingeniería Geológica Computarizada, S.A de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue actualizar la red de medición de los niveles del agua subterránea de este acuífero. Entre las actividades realizadas se definieron las evoluciones de los niveles del agua en distintos periodos de observación, resultantes de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que está sujeto el acuífero. Concluyó con la continuidad a los recorridos de campo recabando datos de profundidad de los niveles de agua subterránea, partiendo de la red piloto de monitoreo piezométrico establecida en trabajos previos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS EL HUNDIDO (0506) Y LA PAILA (0509) EN EL ESTADO DE COAHUILA EN 2013. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para la Comisión Nacional del Agua. Tuvo como objetivo actualizar la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y así sustentar el ordenamiento jurídico requerido en el acuífero. Como actividades se levantó un censo de los aprovechamientos, registrando profundidad y elevación del nivel estático, esta información sirvió para realizar configuraciones de profundidad y elevación. Durante estas visitas se tomaron muestras de 13 pozos para el análisis hidrogeoquímico y de calidad del agua. También

se realizaron pruebas de bombeo en 11 pozos que sirvieron para determinar la conductividad hidráulica y la transmisividad. Como parte de las conclusiones se definió la red del flujo, los valores de entrada y salida que ayudaron a determinar que se trata de un acuífero sobreexplotado, el cual no cuenta con volúmenes adicionales para otorgar concesiones.

ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO LA PAILA, ESTADO DE COAHUILA EN 2023. Realizado por el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte y la Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua. Tuvo como objetivo la reactivación de la red piezométrica establecida en el año 1998. Sus actividades consistieron en el levantamiento *in situ* de la profundidad al nivel estático, elevación del terreno y altura de los brocales para cada uno de los aprovechamientos contemplados en la red de monitoreo. La información recabada sirvió como insumo para elaborar las configuraciones de la profundidad, elevación y evolución del nivel estático.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El acuífero La Paila se encuentra contenido en la Provincia Fisiográfica denominada Sierra Madre Oriental y en la Subprovincias: Laguna de Mayrán, Sierra de la Paila y la Subprovincia Pliegues Saltillo-Parras. Se caracteriza por sus grandes llanuras más o menos encerradas, y las sierras paralelas entre sí, orientadas NW-SE y E-W.

3.2. Clima

Según la clasificación de climas de W. Kôppen modificada por E. García para las condiciones de México, en el acuífero prevalece un clima tipo BW muy seco, subtipo BWhw, que se clasifica como seco a desértico, semicálido con invierno seco, muy extremoso, con lluvias que se presentan en verano, e inviernos frescos. La temperatura media anual varía de 8° a 22° C; entre los meses de abril a octubre la media mensual está por arriba de los 25° C, y en el ciclo noviembre a marzo disminuye, siendo los meses de diciembre y enero los más fríos con temperaturas menores a 10° C. La precipitación en el valle La Paila varía de 100 a 400 mm anuales, siendo los meses con mayor registro de lluvias de mayo a octubre, con alrededor de 50 mm, en tanto que en los meses restantes la precipitación mensual es mínima. De acuerdo con lo anterior, la temperatura media anual en la zona es de 15.45° C y la precipitación de 311.4 mm/año. La evaporación potencial media anual varía de 2,119 a 2,618.7 mm anuales,

con un valor medio anual de 2,368.86 mm.

3.3. Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 36 “Nazas-Aguanaval”, Subregión Hidrológica “Río Nazas”, cuencas “Laguna de Mayrán y Viesca”; subcuenca “Laguna de Mayrán”. Se trata de una cuenca cerrada en donde la red superficial que se origina en la zona no alimenta al río Nazas ni a la laguna de Mayrán, hoy desierto de Mayrán, debido a las escasas precipitaciones y a los materiales de textura gruesa depositados a los pies de las sierras que permiten la infiltración.

Los escasos escurrimientos son a través de pequeños arroyos de trayectoria corta, que aún durante la temporada de lluvias no presentan cauces bien definidos, debido a la suave pendiente del terreno. El único cauce definido lo constituye el arroyo Cabrera, que nace en la sierra de Palmas, el cual pasa con la ciudad del mismo nombre, hacia el desierto de Mayrán. El aprovechamiento del agua superficial sólo es por medio de pequeños bordos y lagunas en la temporada de lluvias, cuyo volumen de almacenamiento se destina a los usos pecuario y doméstico principalmente. En el municipio de Parras existen las presas 28 de agosto con una capacidad de almacenamiento de 1.05 hm^3, San Antonio de la Pegajosa, Piedra Blanca y Cecilia, que son también de reducida capacidad.

3.4. Geomorfología

En el área que cubre el acuífero se localizan tres unidades geomorfológicas principales: la primera representa el límite norte correspondiente a la Sierra de La Paila, compuesta de calizas con orientación E-W; la segunda unidad es la zona en la que se desarrolla el valle de depósitos sedimentarios en el que se aloja el acuífero; y la tercera unidad la componen la sierra de Parras constituida por lutitas y areniscas, con orientación NW-SE. La zona en la que se aloja el acuífero tiene una altitud promedio entre 1,100 y 1,310 msnm.

Unidad hidrogeomorfológica I. Domina la mayor parte de la zona y está constituida por valles, lomeríos y depresiones que presentan pendientes bajas, donde las corrientes superficiales prácticamente están ausentes, por lo que representan zonas de infiltración del agua y de recarga al acuífero. Las pendientes de baja densidad, así como la ausencia de drenaje, son parámetros que indican que el mayor porcentaje de agua que precipita o circula sobre ellas se infiltra al acuífero, a través de los materiales

granulares, fracturas y diaclasas que los caracterizan.

Unidad hidrogeomorfológica II. También llamada de mesetas, se distribuye principalmente en la porción norte de la sierra La Paila. Presenta zonas con propiedades de infiltración diversas; en las que las cimas de los elementos geomorfológicos muestran infiltración sobre todo en las zonas de alto fracturamiento, donde las pendientes son menores de un 1%; sin embargo, las características petrofísicas de la roca (material pelítico), puede disminuir su capacidad de infiltración o aumentar en los casos en que se combine la presencia de calizas, materiales granulares producto de la erosión y fracturamiento.

Por el contrario, los bordes de las mesetas muestran alta densidad de drenaje, por lo que el grado de infiltración se considera bajo. Lo anterior, aunado a que los materiales que los conforman son rocas muy consolidadas, provoca que en el subsuelo funcionen como barreras tanto laterales como verticales del acuífero; sin embargo, el desarrollo de fracturas y estructuras de disolución sobre las laderas, aumenta la capacidad de infiltración.

Unidad Hidrogeomorfológica III. Está representada por las zonas de pendientes abruptas (20° o mayores), que corresponden a las sierras en las que se presenta un mayor porcentaje de escurrimiento en comparación con la infiltración. Esto se manifiesta por la alta densidad de drenaje en comparación con las restantes geoformas, y en los casos en que las rocas son muy compactas, funcionan como barreras laterales y basamento del acuífero; la presencia de calizas y fracturas son factores que favorecen la infiltración.

4. GEOLOGÍA

En la región predominan rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, que descansan sobre rocas del Paleozoico-Precámbrico. Hacia la porción del valle de La Paila, se advierte la presencia de sedimentos marinos y continentales, y en menor proporción de tipo volcánico (figura 2).

4.1. Estratigrafía

Las rocas que afloran en el área del Acuífero La Paila representan secuencias de edad que varían del Cretácico Inferior hasta el Cuaternario y se describen en orden cronológico a continuación.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Aurora

Humphrey (1956) propuso que el término Formación Aurora fuera modificado para incluir todas las rocas carbonatadas del NE de México ubicadas estratigráficamente entre la Formación La Peña o sus equivalentes, abajo, y la Formación Cuesta del Cura y otros equivalentes del Grupo Washita o la Formación Kiamichi arriba. Aflora en el área de Parras, en los cañones Grande, Cuesta del Cura, Arroyo Ojo de Agua, del Potrero, de Plataneros, de Juan Pérez, de Santiago y la Sierra Prieta; así como también en gran parte de la zona Torreón-Monterrey.

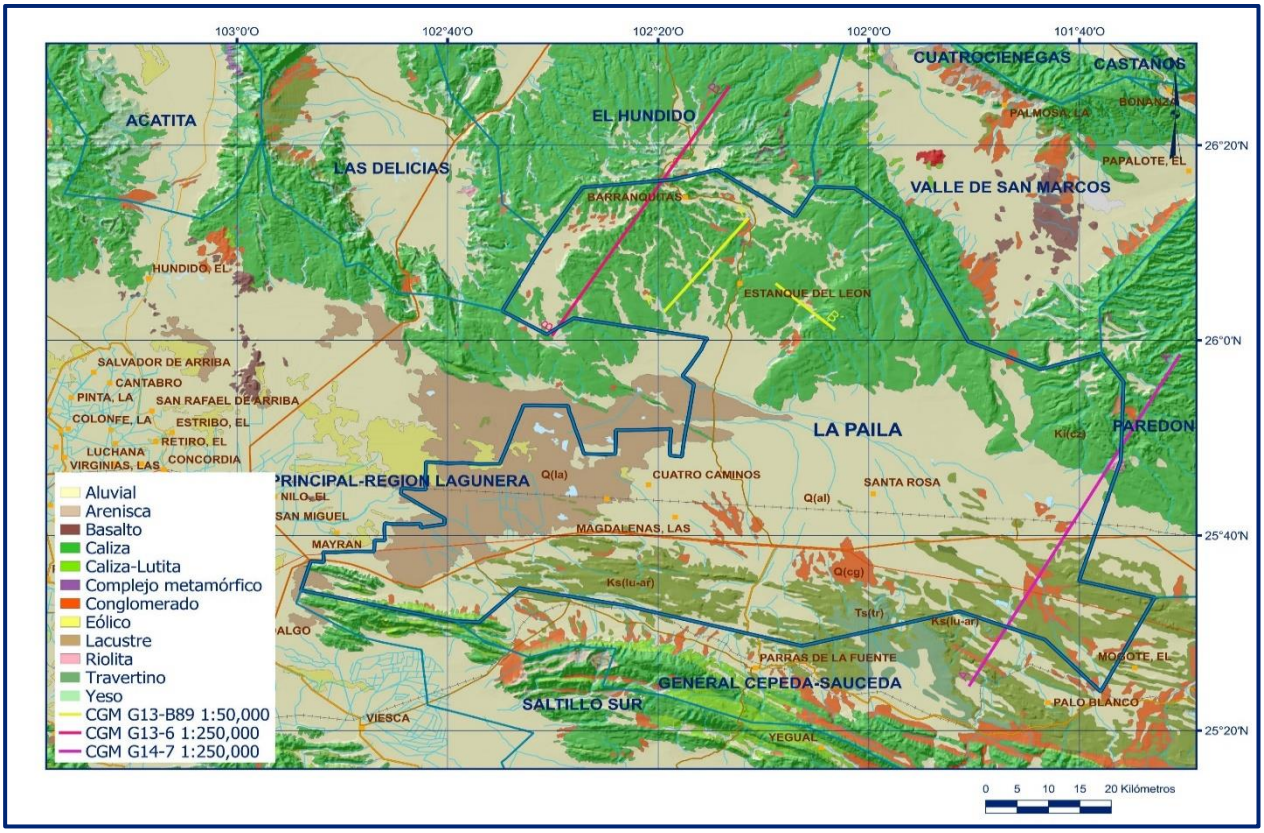


Figura 2. Geología general del acuífero

Está representada por facies de aguas profundas (mudstone y wackstone), de estratificación mediana a gruesa, en ocasiones masiva con nódulos y capas delgadas de pedernal. El color de la caliza es gris crema a gris oscuro que intemperiza a gris amarillento. El espesor varía en la región de 50 a 120 m. Sus contactos inferior y superior con las formaciones La Peña y Cuesta del Cura, respectivamente, son nítidos y concordantes. En el área del acuífero, aflora al oriente de la ciudad de Lerdo, donde está constituida por calizas de estratificación mediana a gruesa, ocasionalmente

masiva, con nódulos de pedernal.

Por su posición estratigráfica parece corresponder al principio del Albiano al Albiano Medio. Se correlaciona con la porción inferior de la Caliza El Abra y la porción inferior de la Formación Tamaulipas Superior, en la Cuenca Tampico-Misantla; con las formaciones Acatita y Paila del área de Delicias, Coahuila, y con la barrera arrecifal denominada Formación Viesca. Su litología y contenido fósil indican que su depósito ocurrió en facies de cuenca y se desarrolló alrededor de la Plataforma de Delicias (Albiano-Cenomaniano). Presenta una permeabilidad alta, funcionando como unidad hidrogeológica transmisora y almacenadora de agua subterránea para formar acuíferos importantes de ocurrencia regional.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Fue estudiada por primera vez por Emil Bosé en 1906 en la Sierra de Parras y posteriormente definida por Kelly en 1936 en su localidad tipo de Delicias Coahuila, específicamente en el afloramiento localizado en el flanco oriental del Cerro La Indidura, localizado aproximadamente a 8 km al norte de Tanque Toribio, en donde consiste de 30 m de lutitas y calizas resquebrajadas y calizas lajeadas. Aflora ampliamente en las estructuras anticlinales y se identifica fácilmente en campo debido a la erosión diferencial con respecto a las formaciones más resistentes que la encajonan, formando puertos y valles sobre los sinclinales. Consiste de una secuencia de wackestone areno arcilloso, que varía gradual y transicionalmente a intercalaciones de lutitas calcáreas; estratificada en capas delgadas y medianas con espesores de 5 a 20 cm y 30 a 60 cm, respectivamente; de coloración gris obscuro a negro en muestra fresca, cambiando comúnmente a pardo amarillento y ocasionalmente en tonalidades rosáceas y rojizas, con presencia de estructura laminar, fracturas y vetillas rellenas por calcita, así como diseminaciones de óxidos.

En ocasiones presenta impresiones y moldes de bivalvos (*Inoceramus labiatus*). Su espesor varía de 350 a 800 m. Sobreyace por medio de un contacto concordante y abrupto a la Formación Cuesta del Cura, solo identificado por el incremento de sedimentos pelíticos y la ausencia de pedernal. El cambio de color al intemperismo y la disminución en el espesor de los estratos, son características que definen también el límite entre esas unidades. Su edad corresponde al Cenomaniano Inferior-Santoniano. Aflora en la Sierra Las Noas, donde presenta un conglomerado basal, que

indica una emersión de la plataforma de Coahuila; en las sierras de Solís y de Texas, localizadas al noreste de Torreón. Su espesor promedio es de 300 m.

Geohidrológicamente, por su permeabilidad de media a alta, funciona como unidad transmisora de agua hacia la Formación Aurora, y aunque en el área no se tiene evidencia de su explotación como acuífero, su fracturamiento secundario y condición estructural, le confieren buena posibilidad de constituir acuíferos

Formación Lutitas Parras

Esta unidad aflora sobreyanciendo concordantemente a la Formación Indidura y consta de lutitas cuya edad corresponde al Coniaciano-Santoniano. Su contacto superior es transicional a los componentes del grupo Difunta.

Grupo Difunta

Se encuentra ampliamente distribuida en los bordes del área de acuífero, como pequeñas sierras o cejas de relieve bajo y escarpado. Este grupo está constituido por lutitas calcáreas, limolitas y areniscas calcáreas; en la porción sureste del valle afloran en forma discordante sobre la Formación Aurora. Presenta alto fracturamiento, por lo que son altamente permeables en estas porciones, donde transitan los volúmenes de agua subterránea provenientes de las sierras circundantes hacia el valle.

CENOZOICO

Comprenden sedimentos continentales de yeso y travertino, así como rocas volcánicas basálticas, cuya formación tuvo lugar a fines del Cenozoico y principios del Cuaternario.

Formación Ahuichila

Fue estudiada por primera vez por Emil Bosé en 1906 en la Sierra de Parras y posteriormente definida por Kelly en 1936 en su localidad tipo de Delicias Coahuila, específicamente en el afloramiento localizado en el flanco oriental del Cerro La Indidura, localizado aproximadamente a 8 km al norte de Tanque Toribio, en donde consiste de 30 m de lutitas y calizas resquebrajadas y calizas lajeadas. Aflora ampliamente en las estructuras anticlinales y se identifica fácilmente en campo debido a la erosión diferencial con respecto a las formaciones más resistentes que la encajonan, formando puertos y valles sobre los sinclinales. Consiste de una secuencia

de wackestone areno arcilloso, que varía gradual y transicionalmente a intercalaciones de lutitas calcáreas; estratificada en capas delgadas y medianas con espesores de 5 a 20 cm y 30 a 60 cm, respectivamente; de coloración gris obscuro a negro en muestra fresca, cambiando comúnmente a pardo amarillento y ocasionalmente en tonalidades rosáceas y rojizas, con presencia de estructura laminar, fracturas y vetillas rellenas por calcita, así como diseminaciones de óxidos.

Su espesor varía de 350 a 800 m. Sobreyace por medio de un contacto concordante y abrupto a la Formación Cuesta del Cura, solo identificado por el incremento de sedimentos pelíticos y la ausencia de pedernal. El cambio de color al intemperismo y la disminución en el espesor de los estratos, son características que definen también el límite entre esas unidades. Su edad corresponde al Cenomaniano Inferior-Santoniano. Estas rocas comprenden a sedimentos continentales clásticos calcáreos que descansan sobre la Formación Aurora y a depósitos de yeso. Se localiza en la porción sur del valle, presenta baja permeabilidad por la compactación de sus componentes, por lo que funcionan como capas confinantes de distribución irregular en el subsuelo. Los depósitos de yeso se localizan principalmente en las porciones oriental y suroccidental del valle; tienen aspecto masivo y ocupan las depresiones de las sierras. También son de permeabilidad baja, funcionando como confinante de la roca que sobreyace.

Basaltos

Afloran hacia el noreste del valle y están representados por rocas basálticas de grano fino, con contenido de olivino e intenso fracturamiento, condición que las convierte en rocas transmisoras del agua pluvial infiltrada hacia rocas más profundas del subsuelo. Su edad es Cenozoico Superior y Cuaternario

CUATERNARIO

Está representado por las rocas más jóvenes consistentes de materiales aluviales, gravas, arenas, limos y arcillas derivadas de la erosión de las sierras donde se originan los escurrimientos superficiales que descargan en la laguna de Mayrán, condición que reguló la depositación de estos materiales como relleno de la depresión tectónica, formando abanicos aluviales, y las unidades de roca descritas a continuación:

Conglomerados

Estos depósitos clásticos están constituidos por fragmentos de rocas calizas e ígneas,

de escaso espesor con estratificación cruzada; que afloran en las partes bajas de la planicie; su grado de cementación les confiere muy baja permeabilidad, funcionado como confinante de rocas subyacentes.

Depósitos de arenas y gravas

Constituidos por gravas, arenas y clastos de caliza con costras de caliche, de formas subredondeadas que conforman los abanicos aluviales y lomeríos alargados, descansan en forma discordante sobre las calizas de la Formación Aurora. Funcionan como transmisores de agua hacia toda la secuencia clástica en el subsuelo.

Depósitos de pie de monte

Clásticos angulosos mal clasificados, gravas y arenas de origen diverso, que afloran en los bordes de las sierras del norte y sur del valle; de permeabilidad media, por lo que permiten el paso del agua hacia el subsuelo y recargan al acuífero granular.

Depósitos aluviales

Constituidos por limos y arcillas con ocasionales laminillas de caliche interestratificadas, distribuidos hacia la planicie del valle, de permeabilidad variable según la preponderancia granulométrica de sus componentes; constituyen el acuífero en explotación por la mayoría de las captaciones de agua subterránea.

Depósitos lacustres

Estos depósitos están constituidos por arcillas y limos que ocupan las partes más bajas del valle, como restos de antiguas lagunas de inundación, son de baja permeabilidad y funcionan como confinantes, dificultando el paso del agua hacia mayores profundidades.

4.2. Geología Estructural

El valle de La Paila es de origen tectónico, muestra evidencias superficiales de eventos de deformación y plegamiento con ruptura por efecto de un sistema paralelo de fallas geológicas del tipo normal, con orientación E-W y localizadas en el flanco norte de la sierra de Mayrán. Este elemento estructural, representado por una fosa tectónica, tuvo su origen en las etapas de deformación terrestre por efecto de la Revolución Laramídica, cuyos movimientos de tipo compresivo y distensivo, regularon la sedimentación actual que sepultó a los sedimentos marinos del Cretácico.

En el intervalo geológico de edad Albiano-Cenomaniano, ocurre una importante transgresión marina que origina el desarrollo de gruesas secuencias de rocas carbonatadas, entre ellas las rocas calizas de la Formación Aurora. Como efecto de la conformación del marco paleogeográfico, normativo de la sedimentación de la zona, durante el Cretácico Superior tuvo lugar el depósito de sedimentos terrígenos que poco después sufrieron deformaciones orogénicas y un levantamiento general posterior. Algunas de las secuencias sedimentarias depositadas, de Edad Cretácico Superior se reconocen como las Formaciones Indidura y Difunta.

Las deformaciones de la Orogenia Laramide se desarrollaron principalmente durante el Cenozoico Inferior, afectando estructuras anticlinales y sinclinales, simétricas y asimétricas, que conforman las sierras y serranías que dominan el paisaje del área. Posterior a estos eventos tectónicos sucedió la evolución continental de la región, con importantes depósitos continentales favorecidos por el fallamiento normal ocurrido durante el Cenozoico Superior. Los eventos correspondientes a la actividad ígnea sucedieron en el Cenozoico, sobre todo en el Oligoceno, incluyendo los derrames basálticos del Plio-Cuaternario. En el área se presentan los Terrenos Tecnoestratigráficos Parral y Sierra Madre. La sedimentación fue controlada por sistemas de fosas y pilares originadas durante el Jurásico superior-Cretácico inferior.

Los bloques de basamento controlan los sistemas de pliegues y cabalgaduras productos de la deformación laramídica ocurrida a finales del Cretácico al Eoceno, y que explica que en la zona de la Isla de Coahuila (Laguna de Mayrán), siendo un elemento positivo, las rocas sedimentarias se presenten deformadas en pliegues amplios, mientras que, cercano al elemento rígido, existen estructuras mayores con alta complejidad, como son grandes cabalgaduras, y zonas de transferencia, existiendo también fallamientos normales y laterales, pliegues anticlinales y sinclinales (abiertos, de rodilla, recumbentes, recostados y encontrados).

4.3. Geología del Subsuelo

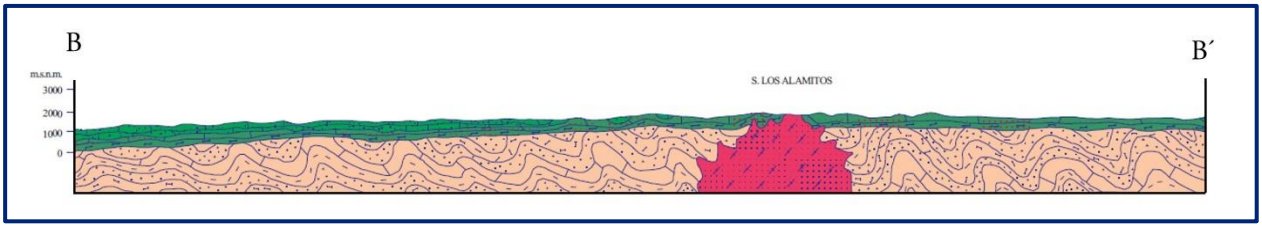
De acuerdo con la evidencia de la geología superficial y estructural, la geofísica y la información obtenida a partir de cortes litológicos de pozos, se puede establecer que existe un relieve sepultado conformado por rocas sedimentarias intensamente plegadas a lo largo de ejes orientados en sentido general NW-SE, sobre el que se depositaron gruesos espesores de materiales aluviales, por lo menos de dos edades diferentes: los conglomerados polimícticos de la Formación Ahuichila, empacados en

una matriz calcárea y limosa; sobre el que se acumularon potentes depósitos aluviales, fluviales y lacustres no consolidados.

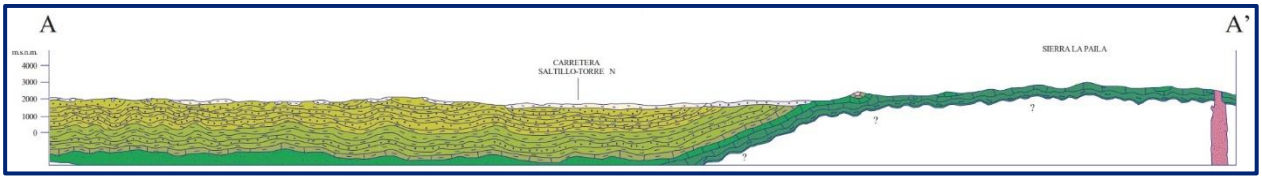
El acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales, fluviales, lacustres y de pie de monte, de granulometría variada, que se alternan e interdigitan tanto vertical como horizontalmente, que son producto del intemperismo de las rocas que rodean los valles, y los conglomerados polimícticos que los rellenan; cuyo espesor alcanza hasta 1000 m de relleno de abanicos aluviales en los bajos estructurales originados por las fallas. Estos depósitos granulares son el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se originaron durante la fase distensiva que ocurrió después de la Orogenia Laramide, en los que la disposición errática y sobreposición de las facies de los depósitos sedimentarios ocasionan alternancia de horizontes acuíferos y acuitardos a diferentes profundidades, con manifestaciones de filtraciones o "lloraderos" en los niveles más profundos de los pozos.

La porción inferior está alojada en un medio fracturado altamente permeable, constituido por las rocas de la Formación Indidura, que transmite agua hacia las calizas de la Formación Aurora y puede funcionar como acuífero confinado o semiconfinado debido a que están sub y sobreyacidas por rocas arcillosas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento del acuífero, están constituidas por las rocas arcillosas de la Formación Ahuichila, los depósitos de yeso y las rocas ígneas intrusivas.

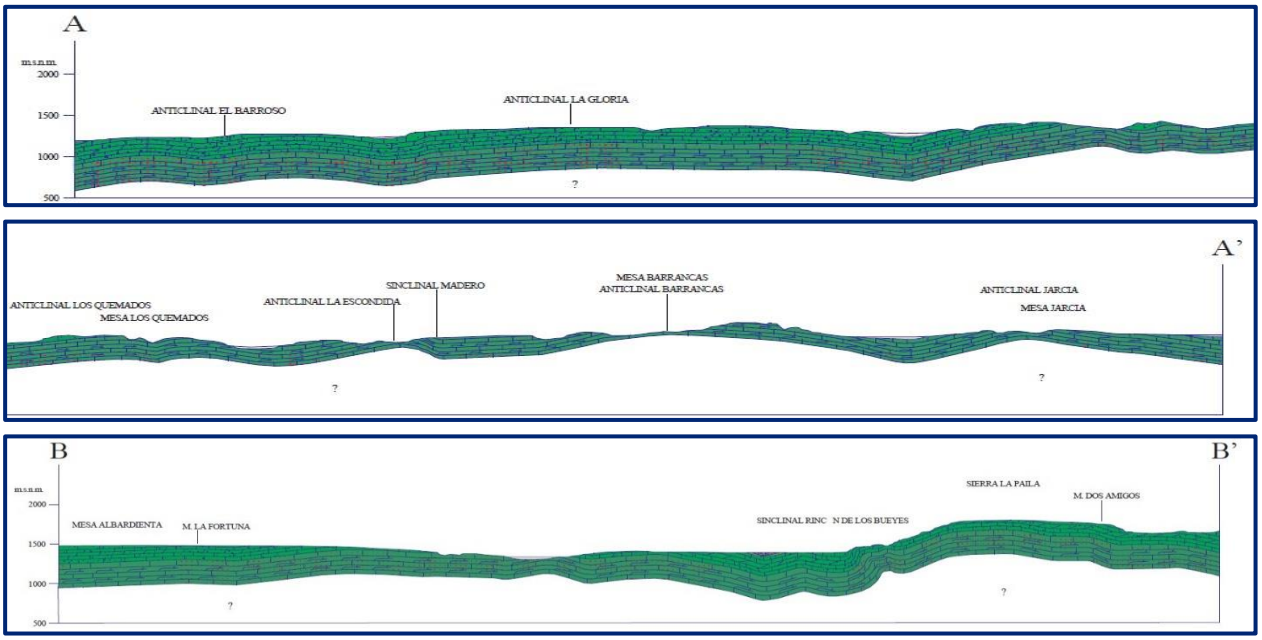
El basamento regional está constituido por la secuencia de rocas volcánicas, sedimentarias y lechos rojos de la Formación Nazas. La configuración del basamento define la presencia de varios bajos estructurales orientados NS y NW-SE, cuya continuidad meridional es interrumpida por una falla de desplazamiento lateral. En la figura 3 se presentan secciones geológicas esquemáticas que muestran la compleja geología estructural y del subsuelo.



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-6 Tlahualillo de Zaragoza. Escala 1:250,000 SGM, 2008



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-7 Monterrey. Escala 1:250,000 SGM, 2008



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-B89 Estanque del León. Escala 1:50,000 SGM, 2009

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero conformado por un medio poroso en su porción superior, que está constituido por sedimentos aluviales, fluviales y lacustres, de granulometría variada, depositados en los valles y en los cauces de ríos, arroyos y planicies aluviales, así como conglomerados polimícticos y depósitos de pie de monte acumulados en las estribaciones de las sierras; cuyo espesor conjunto alcanza hasta 1000 m en los depocentros que constituyen las fosas tectónicas.

El medio fracturado está alojado en rocas calcáreas y volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calizas. Ambos medios constituyen un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, que puede presentar condiciones locales de semiconfinamiento debido a

la presencia de sedimentos arcillosos.

El movimiento del agua subterránea está controlado por el patrón de fallas inversas y fracturas, en el que las trayectorias preferenciales son definidas por la geología estructural y por las características texturales, estructura y disposición de los sedimentos granulares.

La secuencia de rocas carbonatadas del Cretácico Inferior y Superior, constituye un acuífero de alta permeabilidad que ha demostrado su potencial, y que, al estar encajonadas por rocas arcillosas, puede presentar condiciones de **semiconfinamiento y confinamiento**.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero en explotación, se analizó la información de pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que fueron realizadas en el estudio realizado en 2013. De su interpretación por métodos analíticos convencionales y usando el método de Theis, se establece que los valores de transmisividad varían entre **1.74 x 10^{-4} y 3.59 x 10^{-3} m^2/s**, en tanto que la conductividad hidráulica varía de **0.02 a 0.95 m/d (2.5 x 10^{-7} a 1.1 x 10^{-4} a m/s).** Los valores más altos de estos parámetros se registraron al noreste de Santa Rosa y tienden a disminuir hacia los poblados San José de Mahoma, San Patricio y La Guadiana; en tanto que los más bajos se presentan en el valle de depósitos aluviales entre Molino Viejo y San Francisco del Progreso.

Los valores de las transmisividades se obtuvieron de las pruebas de bombeo realizadas en el acuífero granular, constituido por materiales clásticos de gravas y arenas de origen aluvial.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información piezométrica recabada por el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua, para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 1998-2023, por ser el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial en los pozos perforados en el acuífero regional.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2023 muestra valores que variaron, de manera general, de 50 m a 105 m, los cuales se incrementan debido a dos efectos: por topografía, desde el centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan, y por concentración del bombeo hacia el centro de las zonas de extracción intensiva. Las profundidades más someras, de 15 a 20 m, se presentan en la porción oriental del acuífero, coincidiendo con la concentración de pozos en los alrededores de la Estación Marte del ferrocarril y el poblado El Pilar de Richardson.

Los niveles más profundos, de 100 a 105 m, se registran en el centro del valle, siendo la localidad Estación Madero, ubicada en el municipio de Parras, donde se registra la profundidad máxima a 108 m de la superficie. Las profundidades se tornan menores hacia la periferia de la configuración. (figura 4).

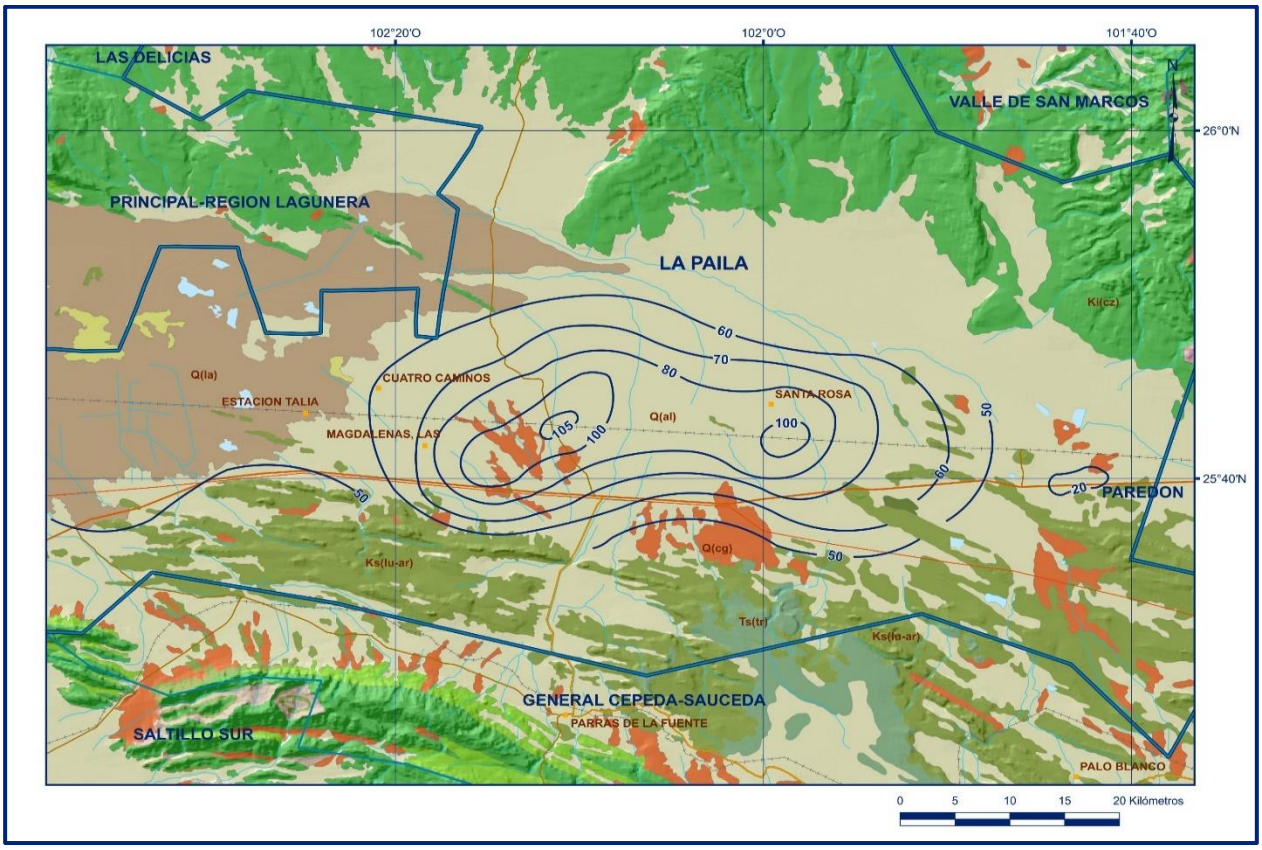


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2023)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2023 registró valores que varían de 1,030 a 1,290 msnm. Las menores elevaciones, de 1,030 a 1,040 msnm, se registran en las zonas de mayor extracción de agua para uso agrícola, localizadas entre las localidades Cuatro Caminos y Santa Rosa; en tanto que las elevaciones mayores, de 1,230 y 1,290 msnm, se presentan hacia las estribaciones de la sierra de Parras, desde donde el flujo del agua subterránea se dirige de manera concéntrica hacia los conos de abatimiento localizados en el centro del valle. En el límite este se identifica un flujo de salida, lo que podría indicar una posible interconexión con el acuífero Paredón (figura 5).

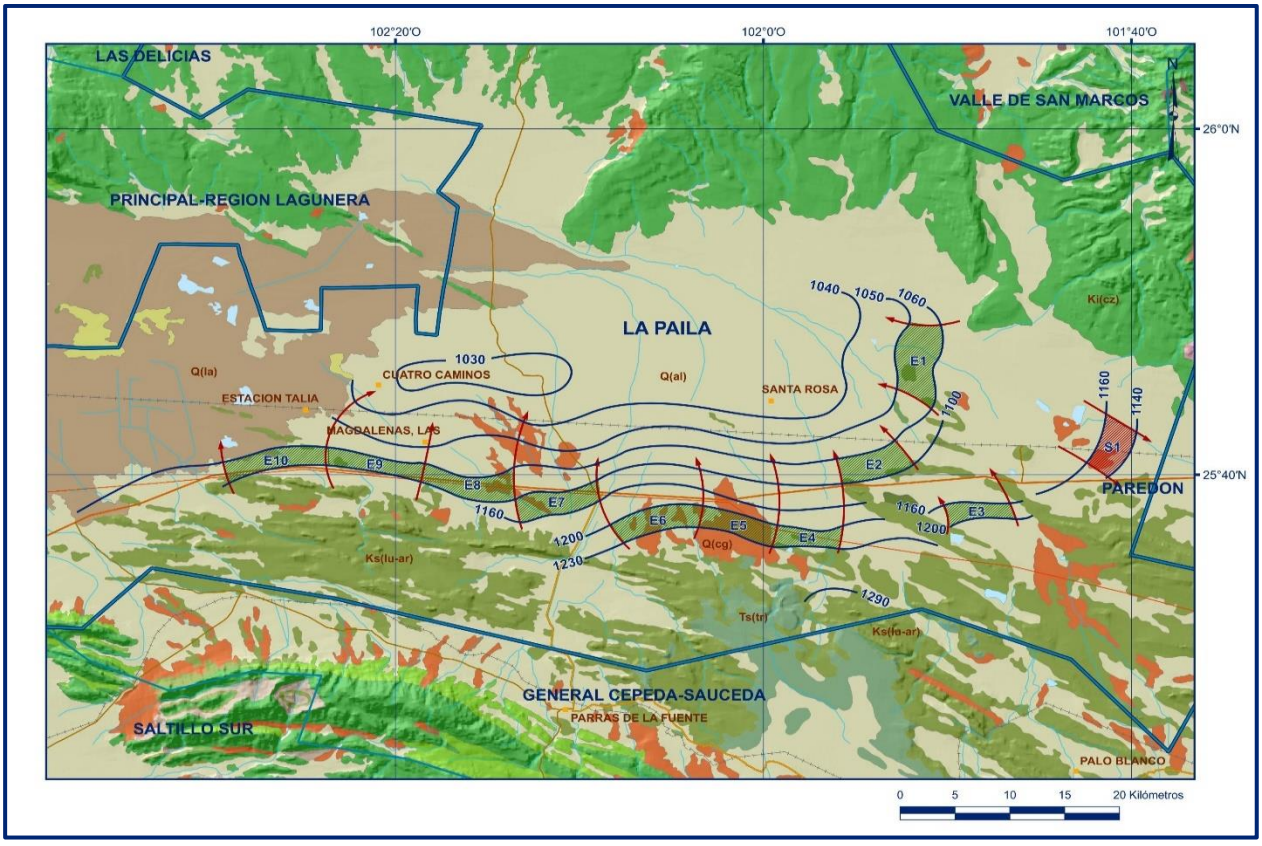


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2023)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1998-2023 registró abatimientos generalizados en la mayor parte de la zona de explotación, cuyos valores extremos varían de 5 a 60 m, que representan 0.2 a 2.4 m anuales (figura 6). Los máximos abatimientos, de 40 a 60 m, se registran en el centro del acuífero y definen los conos que se presentan en las zonas de extracción intensiva para uso agrícola,

ubicadas en las cercanías del poblado Santa Rosa. Rodeando a estas zonas y haciendo más extensos los conos de abatimiento, se presentan valores de 10 y 20 m en toda la región central del acuífero, desde Cuatro Caminos hasta Estación Marte. Desde estas regiones, hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles, y hacia la laguna de Mayrán, los abatimientos disminuyen gradualmente hasta ser imperceptibles. En esta región el abatimiento promedio anual es de 1.2 m.

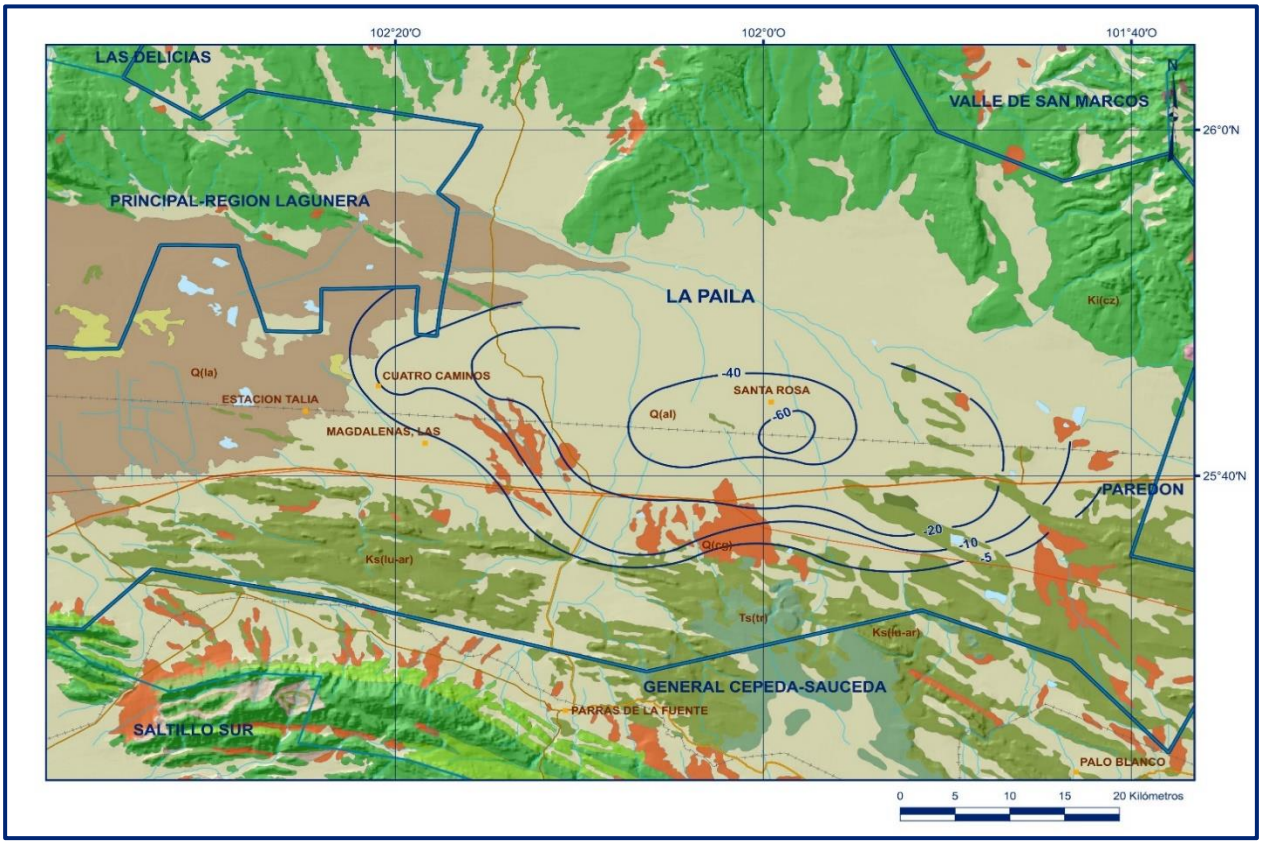


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1998-2023)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio en 2013, se tomaron 12 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las mediciones in situ incluyeron temperatura de descarga, conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno (pH), además, se determinaron las concentraciones de los siguientes parámetros químicos: alcalinidad, sólidos totales disueltos (STD), potencial redox, (Eh), dureza total, dureza de calcio, sulfato, nitrato, sodio, boro, calcio, magnesio, cloruro, potasio, hierro, fluoruro, sílice y

manganeso.
Adicionalmente se tomaron 21 muestras de agua subterránea en el año 2018, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos efectuados, se establece que las concentraciones de algunos iones y elementos sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en 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. La concentración de SDT presenta valores extremos que varían de 1133 a 3896 mg/l para el año 2018, por lo que las 21 muestras de agua subterránea sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido en la norma referida. Otros parámetros cuyas concentraciones superan los LMP son los siguientes: los sulfatos, cuyas concentraciones varían de 275.17 a 1451 mg/l, y es superado el LMP de 400 mg/l en 17 muestras de agua subterránea; los coliformes fecales están presentes en 9 muestras de agua subterránea con una concentración máxima de 1239 NMP/100ml, mientras que el LMP indica que deberían estar ausentes; los nitratos rebasan el LMP de 11 mg/l en 6 muestras de agua subterránea con concentraciones máximas de 31.57 mg/l; el hierro rebasa el LMP de 0.3 mg/l en dos muestras, con concentraciones máximas de 1.92 mg/l. Ello indica que además de las fuentes de origen natural de deterioro de la calidad del agua subterránea, están presentes fuentes de contaminación relacionadas con las actividades agrícolas, pecuarias y de aguas residuales.

De acuerdo con la clasificación establecida por la *American Public Health Association* (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 1133 a 3270 μS/cm. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registraron en la porción oeste y sur del acuífero y se incrementan en dirección noreste, confirmando la dirección preferencial del flujo

subterráneo.

Las temperaturas registradas variaron de 21.1 a 30.4 °C, predominando los valores de 25 a 27 °C, en tanto que el pH varía de 6.8 a 8.1. La distribución de la temperatura es muy regular, en donde los valores mayores de temperatura se registraron al norte de la comunidad Estación Madero, en el centro del acuífero, así como en la porción este, entre El pilar de Richardson y Estación Marte. Los valores más bajos se presentaron en el agua subterránea somera colectada en los alrededores de Cruz Verde y Molino Viejo, ubicados al sur del acuífero. La distribución de la temperatura sugiere la presencia de sistemas de flujo que circulan a diferentes profundidades a través de rocas y materiales de diferente naturaleza.

También se utilizaron los diagramas de Schoeller correspondientes a los pozos ubicados hacia el norte y sur de la porción central del valle, con las siguientes relaciones iónicas. Na > Ca ε Mg y SO_4 > Cl ε HCO_3. Por lo que se puede decir que son aguas de la misma familia sulfatada–sódica; característica extensiva a las partes occidental y oriental del valle. En consecuencia, el agua subterránea en el valle La Paila tiene alta salinidad, infiriéndose además que el flujo subterráneo general es de sur a norte. Asimismo, el alto contenido de sulfatos sugiere que las aguas han tenido un prolongado contacto con las rocas calizas, minerales evaporíticos, y la influencia de procesos de evaporación a que ha estado sujeta la depositación en el valle.

Atendiendo al criterio agrícola de clasificación de agua, se analizó la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), concluyendo que la mayoría de las muestras analizadas se clasifican como C_4-S_2, indicando que son altamente salinas y de segunda clase por la tendencia a la adsorción de sodio, por lo que sólo pueden utilizarse en cultivos tolerantes a las sales.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del único censo realizado en el año 2013, se registró la existencia de 516, de los cuales 506 son pozos, 8 norias y 2 manantiales, de los cuales 474 se consideraron activos y 42 están fuera de servicio. De total pozos activos, 423 se dedican al uso agrícola, 32 al público-urbano, 17 al pecuario y 2 al industrial. El volumen total de extracción asciende a **49.1 hm^3 anuales**, de los cuales 48.7 hm^3 (99.2 %) se destinan al uso agrícola, 0.3 hm^3 (0.6 %) para uso público-urbano y 0.1 hm^3 (0.2 %) para uso pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1998-2023, en una superficie de **1,504 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

Entradas(E) - Salidas(S) = 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:

Recarga total - Descarga Total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Este término es uno de los que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rv + Eh + Ri - B - Sh = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Dónde:

Rv = Recarga vertical
Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal
Ri = Recarga Incidental
B = Bombeo
Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal
ΔV(S) = Cambio de almacenamiento

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

$$Rv = B + Sh \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

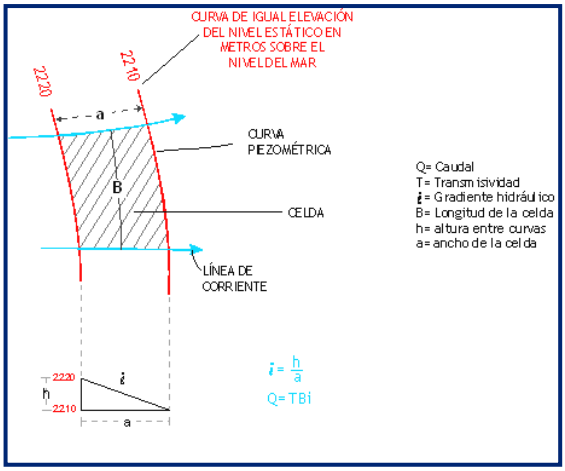
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

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 2023 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)
B = Longitud de la celda (m)
i = Gradiente Hidráulico (adimensional)
T = Transmisividad (m^2/s)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de las celdas definidas. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **9.3 hm^3/año.**

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2023)

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	7750	3677	10	0.0027	0.0005	0.0105	0.3
E2	6328	2906	40	0.0138	0.0002	0.0174	0.5
E3	6036	1703	40	0.0235	0.0002	0.0284	0.9
E4	6134	1782	30	0.0168	0.0002	0.0207	0.7
E5	7113	2163	30	0.0139	0.0002	0.0197	0.6
E6	8004	2583	30	0.0116	0.0001	0.0093	0.3
E7	7763	2397	60	0.0250	0.0003	0.0583	1.8
E8	8772	2282	40	0.0175	0.0002	0.0308	1.0
E9	8690	1582	40	0.0253	0.0002	0.0439	1.4
E10	9718	2099	40	0.0191	0.0003	0.0556	1.8
						TOTAL	**9.3**

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

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

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

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

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna, tomando en cuenta que actualmente la profundidad al nivel estático es superior a los 40 m y las condiciones climáticas de la región, los excedentes de riego se evaporan y el volumen susceptible de infiltrarse al acuífero es muy pequeño. Por lo anterior, **Ri = 4.9 hm^3 anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B). De manera natural, se presenta una salida subterránea (Sh) en la porción sureste del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Estación Marte y El Pilar de Richardson.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de **49.1 hm³ anuales**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera en que se estimaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración del nivel estático y red de flujo subterráneo para el año 2023, mostrados en la figura 5. Como se muestra en la tabla 3, sólo existe una pequeña salida por flujo subterráneo fuera del área de balance que se estima en **0.3 hm³/año**.

Tabla 3 Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal 2023

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)
S1	5297	3104	20	0.0064	0.0003	0.0102	0.3
						TOTAL	0.3

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 1998-2023 (figura 6). Con base en ella y el valor de rendimiento específico promedio de 0.03, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 1,504 km^2, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

ΔV(S) = Cambio de almacenamiento en el período analizado
S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático
H = Valor de la variación piezométrica en el período

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica se pueden observar en la tabla 4. El volumen anual del cambio de almacenamiento es de **-699.9 hm³**, con un promedio anual de **-28.0 hm³**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (1998-2023)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-60	-60	17.5	0.03	-31.5
-60 a-40	-50	150.7	0.03	-226.1
-40 a -20	-30	303.4	0.03	-273.1
-20 a -10	-15	263.5	0.03	-118.6
-10 a -5	-7.5	225.0	0.03	-50.6
	TOTAL	**960.1**	**TOTAL**	**-699.9**
		Promedio anual		**-28.0**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia.

$$Rv = B + Sh \pm \Delta V(S) - Eh - Ri$$
$$Rv = 49.1 + 0.3 - 28.0 - 9.3 - 4.9$$
$$Rv = 7.2\ hm^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = Rv + Eh + Ri$$
$$R = 7.2 + 9.3 + 4.9$$
$$R = 21.4\ hm^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO = RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL - DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA - EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Donde:

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

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **21.4 hm^3/año**, de los cuales 16.5 hm^3 son recarga natural y 4.9 hm^3 recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de 0.3 hm^3 anuales que corresponden a las salidas por flujo subterráneo que se presentan hacia el acuífero Paredón. Por lo tanto. **DNC = 0.3 hm^3 anuales.**

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **75,538,387 m^3 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 del 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.

DMA = R – DNC – VEAS

DMA = 21.4 – 0.3 – 75.538387

DMA = - 54.438387 hm^3/año.

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **54,438,387 m^3 anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Río Bravo y el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte, 2013. Estudio geohidrológico de los acuíferos El Hundido (0506) y La Paila (0509) en el Estado de Coahuila. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Secretaría de Recursos Hidráulicos. Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1973. Estudio geohidrológico preliminar del Valle de La Paila, Coah.