



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CERRITOS-VILLA JUÁREZ (2414),
ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1. Provincia fisiográfica.....	6
3.2. Clima.....	6
3.3. Hidrografía.....	7
3.4. Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1. Estratigrafía.....	10
4.2. Geología estructural.....	16
4.3. Geología del subsuelo.....	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1. Tipo de acuífero.....	19
5.2. Parámetros hidráulicos.....	20
5.3. Piezometría.....	21
5.4. Comportamiento hidráulico.....	21
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	21
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	22
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	23
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	24
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRANEAS.....	27
7.1. Entradas.....	28
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	28
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	29
7.1.3. Recarga inducida (Ri).....	30
7.2. Salidas.....	30
7.2.1. Extracción por bombeo (B).....	31
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	31
7.2.3. Salida a través de manantiales (Dm).....	31
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	31
8. DISPONIBILIDAD.....	32
8.1. Recarga total media anual (R).....	33
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	33
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	33
9. BIBLIOGRAFÍA.....	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 área del acuífero Cerritos-Villa Juárez, definido con la clave 2414 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 22° 05' y 22° 56' de latitud norte y entre los meridianos 100° 07' y 100° 28' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,039 km². Limita al norte con el acuífero Matehuala-Huizache, al oriente con Buenavista, al sur con San Nicolás Tolentino y Río Verde y al occidente con el acuífero Villa Hidalgo, todos ellos dentro del estado de San Luis Potosí (figura 1).

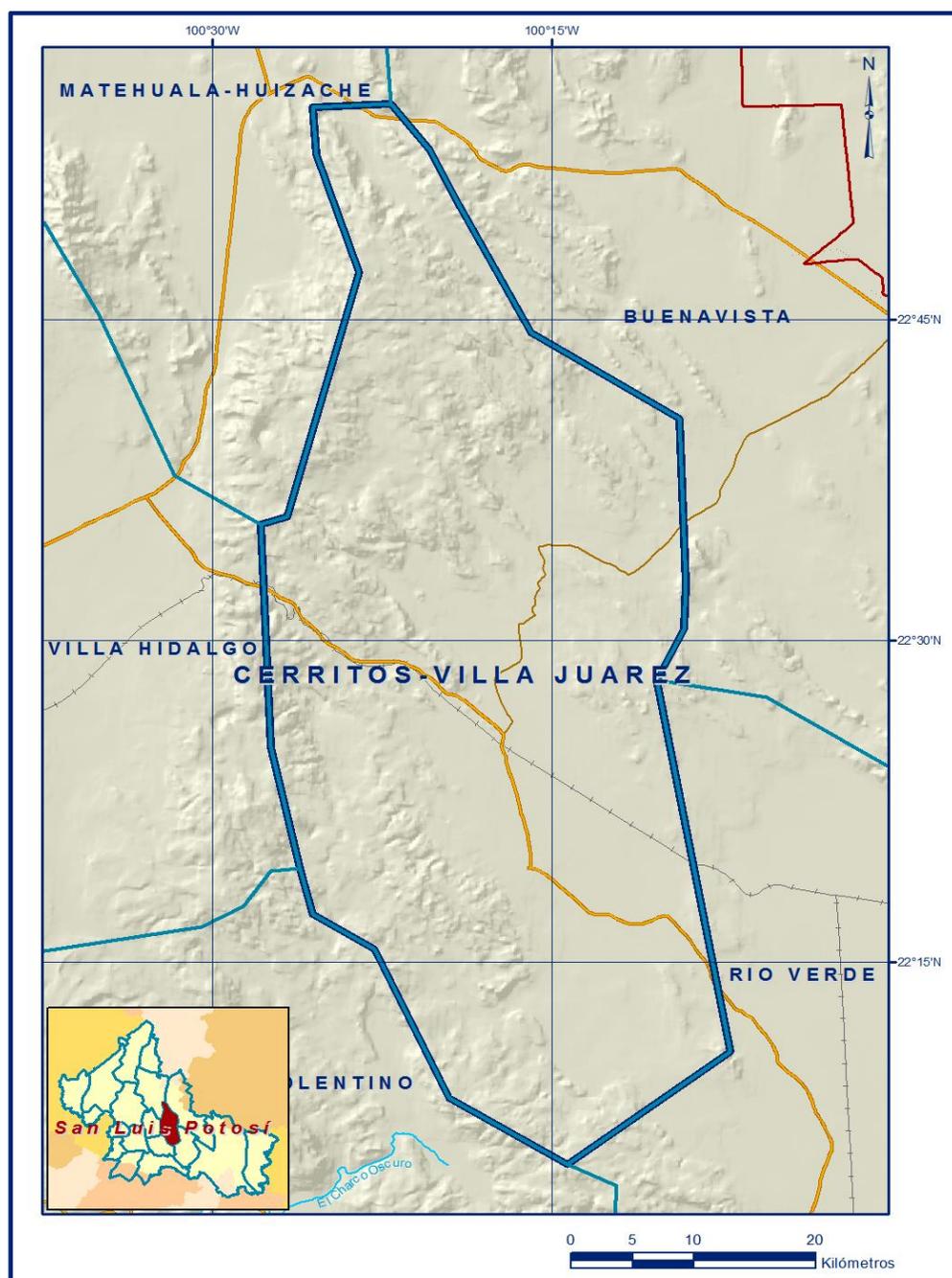


Figura 1. Localización del acuífero.

Comprende gran parte de los municipios de Guadalcázar, Cerritos y Villa Juárez; y pequeñas porciones de San Nicolás Tolentino y Río Verde. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero.

ACUÍFERO 2414 CERRITOS-VILLA JUÁREZ						
VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	100	19	32.3	22	8	38.7
2	100	22	49	22	15	36
3	100	25	33.6	22	17	15.7
4	100	26	6.3	22	19	22.7
5	100	27	24.7	22	25	1.7
6	100	27	49.6	22	35	27.5
7	100	26	41.3	22	35	48.8
8	100	23	29.9	22	47	13
9	100	25	23.7	22	52	43.9
10	100	25	32.6	22	54	56.7
11	100	22	5.7	22	55	6.2
12	100	20	22.3	22	52	54.5
13	100	19	5.1	22	50	21.3
14	100	15	54.7	22	44	23.7
15	100	9	20.8	22	40	23.2
16	100	9	5.1	22	32	39.8
17	100	9	10.4	22	30	31.7
18	100	10	23.2	22	28	10.4
19	100	7	5.9	22	10	48.2
20	100	14	18.2	22	5	32.5
1	100	19	32.3	22	8	38.7

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cerritos-Villa Juárez pertenece al Organismo de Cuenca IX “Golfo Norte”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local San Luis Potosí. Una muy pequeña porción al sur del acuífero, se encuentra sujeta a las disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Municipio de Río Verde, S.L.P.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 9 de julio de 1966. Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El usuario principal del agua es el sector agrícola. Dentro de los límites del acuífero no se localiza Distrito o Unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los estudios realizados en la zona son pocos y esporádicos, ya que no han tenido continuidad ni seguimiento. La información recopilada así como su análisis, se desglosan a continuación:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE CERRITOS Y GUADALCÁZAR, ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ. Elaborado para la Secretaría de Recursos Hidráulicos por la empresa ROASA en 1983. El principal objetivo de este trabajo fue determinar la zona acuífera para localizar zonas favorables para la perforación de pozos profundos que ayuden a impulsar el desarrollo agrícola. Concluye que el agua subterránea se encuentra almacenada en materiales granulares de baja permeabilidad en las partes marginales y hacia el centro del valle en conglomerados.

En cuanto a la geoquímica se identificó agua de buena calidad al poniente del área; sin embargo al NW de Palo Seco el agua es de mala calidad debido a la circulación del agua a través de la Formación Guaxcamá.

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LOS ACUÍFEROS DENOMINADOS DE AGUA SALADA, EN LA ZONA CERRITOS-RIO VERDE, ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ. Elaborado para la Comisión Federal de Electricidad por la empresa Acuplan, S.A. en 1984. El propósito de este estudio fue conocer la calidad química del agua y su distribución, así como determinar las zonas de recarga, niveles piezométricos y posibles localizaciones de captaciones con menor contenido de sales, llegando a la conclusión de que el agua del acuífero es de muy mala calidad desde el punto de vista hidrogeoquímico, ya que presenta altas concentraciones de sólidos totales disueltos donde el ion predominante es el sulfato, lo que hace que el agua sea incrustante y no apta para el uso agrícola. Sin embargo, su utilización ha ocasionado la degradación de los suelos en otros tiempos aptos para la ganadería.

ESTUDIO AGROLÓGICO SEMIDETALLADO CERRITOS-VILLA JUÁREZ. Elaborado por la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1983. El propósito del trabajo fue conocer las características físicas y químicas de los suelos, así como las cualidades de la tierra para una selección de acuerdo a su capacidad de uso, detectándose que existen suelos medianamente profundos, muy apropiados para la explotación de cultivos anuales, aunque muchas tierras agrícolas se clasifican como de segunda a cuarta clase.

En 2007 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó, a través de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN EL ACUÍFERO CERRITOS-VILLA JUÁREZ, SLP. Los objetivos planteados incluyen la actualización el conocimiento de las condiciones geohidrológicas mediante un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, así como contar con la información necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y establecer la disponibilidad media anual de agua subterránea en las unidades hidrogeológicas en estudio.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El acuífero se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental (INEGI 2002), subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales.

La topografía de la zona incluye en la región centro-suroriental una planicie clasificada como Llanura de Piso Rocoso, rodeada por montañas: al occidente por la sierra El Tablón, al norte por la sierra El Rincón y sierra San Pedro, al oriente por las sierras Pelona y El Tapanco, todas clasificadas como Sierras Pliegue con llanuras.

Al noreste existe otra pequeña planicie en la que se encuentra el poblado Colonia Agrícola San José. La planicie tiene una elevación del orden de 1100 msnm, las mayores elevaciones en las sierras adyacentes alcanzan casi 2000 m.

Un importante rasgo fisiográfico en la sierra es la dolina (polje) denominada Joya de Luna, que tiene una dirección NNW-SSE con una elevación del orden de 1400 msnm y dimensiones aproximadas de 9.5 x 4 km.

3.2. Clima

El clima de la zona es de tipo semiárido; de acuerdo con Köppen, modificado por Enriqueta García (1983), para las condiciones de la República Mexicana, se incluyen los tipos $BS_1(g)hw$, lo que significa que es de tipo semiárido, estepario, con temperatura media anual mayor a 18° C y precipitación principalmente en el verano y temperatura máxima en primavera antes del periodo de lluvia.

Las estaciones climatológicas Cerritos y Villa Juárez son representativas del clima en la parte de la planicie, con una precipitación media anual de 604.3 mm, mientras que los datos de la estación Guadalcázar representan las condiciones en las sierras que rodean a la planicie con precipitaciones medias anuales del orden de 744 mm.

La precipitación presenta dos máximos en cada una de las estaciones climatológicas, uno en el mes de junio (1255 mm) y otro en el mes de septiembre (1250 mm), lo que significa que la precipitación presenta una distribución bimodal; este hecho es mucho más significativo para la estación Guadalcázar y un poco menos notorio en las estaciones Cerritos y Villa Juárez.

Las mayores temperaturas medias mensuales se registran en Cerritos y las menores en Guadalcázar, situación probablemente relacionada con las elevaciones de las estaciones. Los meses más calurosos son Mayo o Junio (20° C en Guadalcázar y 25° C en Cerritos), mientras que los más fríos son diciembre y enero (13.5° C en Guadalcázar y 15° C en Cerritos). La temperatura media anual en el área es de **19.6° C**.

En el área del acuífero y sus inmediaciones las estaciones existentes (Cerritos, Villa Juárez, Guadalcázar), reportan datos de evaporación en la región de 2368.8 a 1837.9 mm.

3.3. Hidrografía

La zona se encuentra localizada en la cuenca abierta (exorreica) del Pánuco Región Hidrológica 26, comprendida en la porción nororiental de la cuenca del Río Tamuín en la que los escurrimientos superficiales son principalmente del tipo perenne e intermitente (INEGI, 2002). Específicamente dentro del municipio de Cerritos no existe ninguna corriente superficial de importancia, solo algunos arroyos de carácter intermitente como son: Arroyo Blanco, Arroyo El Llano, La Yegua, San Pedro y La Caldera.

En el municipio de Villa Juárez tampoco existen corrientes superficiales, de carácter perenne, de importancia para el riego, solo se detectan diversos arroyos de condición intermitente en todo el territorio, que únicamente conducen agua en época de lluvia, entre ellos destacan los arroyos La Mora, El Santo, El Tigre, Tecolotes, Las Crucitas, Las Cuevas, El Nacimiento y La Estrella.

La mayoría de las corrientes superficiales son de tipo efímero, con escurrimiento asociado a la temporada de lluvias. El río San Tiburcio es de tipo perenne, se localiza en la porción sur del acuífero y se origina por la descarga de manantiales en la zona de Puerta del Río. Fluye hacia el oriente en dirección a la población de La Gavia, saliendo de la región del acuífero, por lo que constituye la única salida superficial. El drenaje del área es de tipo dendrítico. Otro río importante en la zona es el río La Caldera con sus diferentes afluentes a lo largo de las montañas.

3.4. Geomorfología

El Conjunto geomorfológico de la zona lo constituyen una serie de sierras que alcanzan elevaciones de 1500 a 2,500 msnm, las mayores elevaciones se encuentran en la Sierra Las Pilas, Sierra La Trinidad y Cerro San Cristóbal que se ubican en la parte occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Desde el punto de vista tectonoestratigráfico la región pertenece al Terreno Sierra Madre Oriental.

4. GEOLOGÍA

El registro estratigráfico se inicia en el Neocomiano-Aptiano con una secuencia de yesos y anhidritas, entre los que se intercalan horizontes de dolomitas, pertenecientes a la Formación Guaxcamá. Sobreyaciendo a esta unidad se presenta una secuencia de calizas de plataforma correspondientes a la Formación El Abra dispuesta en estratos gruesos a masivos, que representan en general facies lagunares, pero también hay una serie de montículos arrecifales pequeños dispersos, alrededor de los cuales se desarrollaron facies periarrecifales (figura 2).

El cambio en el depósito, de carbonatos a terrígenos, marca el límite de esta unidad con la Formación Cárdenas que le sobreyace. Esta formación representa el arribo pleno de terrígenos sobre la plataforma, que inició con depósito de lutitas y culminó con predominio de areniscas, lo que significa una progradación del complejo deltaico que terminó en el Maestrichtiano.

Durante el Paleoceno-Oligoceno, la Formación El Abra fue afectada intensamente por diapirismo provocado por las anhidritas de la Formación Guaxcamá, ocasionando un paquete grueso de brecha calcárea, que presenta bloques de travertinos, yeso, ignimbritas y bloques enormes de caliza que han permanecido como pilares en los que aún se distingue su estratificación. A esta brecha se le conoce informalmente como Formación El Realejo. En el centro del Altiplano aflora un depósito de clastos derivados de la brecha calcárea, conocido como Conglomerado El Muerto.

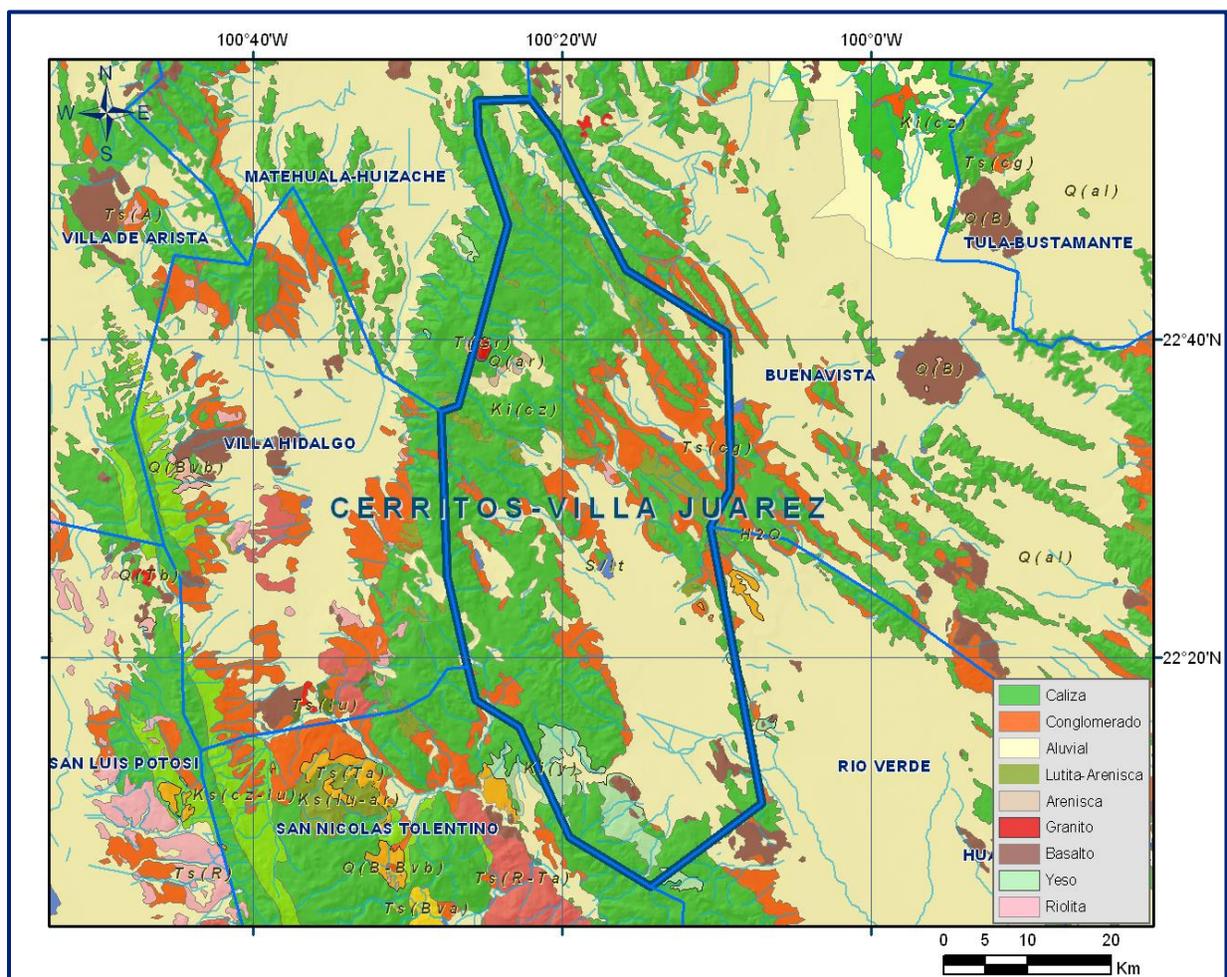


Figura 2. Geología general del acuífero.

En el Oligoceno Superior se emplazaron cuerpos intrusivos; el mayor es un pórfido granítico conocido como intrusivo Guadalcázar, cuya edad se ha estimado de 31 ± 2 Ma, de color gris claro, que contiene como minerales principales cuarzo, feldespato potásico con plagioclasa sódica y biotita en menor cantidad; además de y abundante magnetita y zircón como minerales accesorios.

En los poblados El Pocito, El Oro y en el Cañón de La Bandola (ubicado al poniente del Puerto la Trinidad), se localizan otros cuerpos intrusivos cuarzomonzoníticos que intrusionan a las Formaciones Cárdenas, El Abra y Guaxcamá. El volcanismo efusivo se inició en el Oligoceno con la emisión de un Basalto que aflora en la Mesa Peñoles, sobre el basalto existen remanentes de un flujo de ceniza soldada, de textura porfídica con fenocristales de cuarzo, sanidino, poca oligoclasa y eigrina-augita, conocida como ignimbritas El Leoncito.

Como último evento se tiene el emplazamiento de un Basalto, de textura afanítica, que formó un aparato volcánico que se observa en las inmediaciones del poblado de San Lorenzo del cual toma su nombre.

La denudación de las estructuras levantadas dio origen desde el Mioceno Superior a un manto extenso de conglomerados en las partes adyacentes a las sierras y en los valles intermontanos. La columna culmina con el depósito de aluviones y colusiones del Holoceno.

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica del área, está constituida por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior representado por la Formación Guaxcamá del Barremiano-Aptiano, El Abra del Albiano - Santoniano, el Cretácico Superior por la Formación Tamasopo del Turoniano -Santoniano,

La Formación Cárdenas del Campaniano - Maestrichtiano; el Oligoceno está representado por rocas volcánicas de composición predominantemente ácida como la unidad de riolita-dacita, toba riolítica, ignimbrita-riolita y el final del Oligoceno consiste de derrames de andesita y basalto conformando la unidad denominada Paleógeno-Neógeno Volcánico (Tv).

Del Mioceno Superior al Plioceno afloran unidades terrígenas continentales compuestas por conglomerado polimíctico y arenisca; sobreyaciendo a éstas se tienen arenas y limos. Del Cuaternario son los depósitos de basalto, conglomerado polimíctico y por último se presentan los depósitos del aluvión en los arroyos.

A continuación, se describen las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

CRETÁCICO

Formación Guaxcamá (KnapY-Do). Barremiano-Aptiano

Con el nombre de Formación Guaxcamá, se denominó a una secuencia evaporítica que se encuentra en la porción central de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí, teniendo su localidad tipo a 25 km, al suroeste del poblado de Cerritos, S.L.P., en los alrededores de la mina de Guaxcamá.

Está constituido por yesos y anhidritas bien estratificadas en capas de 5 a 50 cm de espesor, de aspecto sacaroides, de color gris claro a gris oscuro finamente bandeadas; las bandas son de material arcilloso y la coloración se debe a la presencia de material carbonoso. Intercaladas con los yesos se encuentran calizas microcristalinas y dolomitas de color gris oscuro a pardo oscuro, fétidas y fracturadas. Se le considera un espesor de 300 m, de acuerdo al Pozo Guaxcamá 1, perforado por Petróleos Mexicanos.

Está expuesta en la porción occidental del área, en el Picacho Ojo de Agua y al noroeste de la comunidad de San Bartolo. La Formación Guaxcamá subyace a las rocas de la Formación El Abra, su contacto inferior no aflora dentro del área, en el subsuelo esta formación descansa en aparente concordancia sobre sedimentos de la Formación Valle de Guadalupe y discordantemente sobre sedimentos de la Formación Cahuasas.

La edad se considera Barremiano-Aptiano, la especie *Colomiella recta* ha marcado la cima del Aptiano pero en algunos sitios quizá incluye a todo el Neocomiano. Cronológicamente esta unidad se puede correlacionar con parte de las formaciones Tamaulipas Inferior, Valle de Guadalupe, Santuario, Taraises, La Peña y con las calizas Ahuacatlán. La secuencia evaporítica de Guaxcamá fue depositada en una cuenca cerrada, localizada sobre una plataforma y separada del mar abierto, probablemente, por barreras de tipo orgánico, esto último sugerido por la presencia de rocas arrecifales y post-arrecifales dentro de dichas evaporitas.

Formación El Abra (Km-Cz). Albiano - Cenomaniano

El término Caliza El Abra fue aplicado a las calizas del subsuelo de los campos petroleros de la Faja de Oro, correlacionándolas, además, acertadamente en edad con las rocas de la Caliza Tamaulipas.

Las rocas de esta unidad afloran en el área de la Sierra El Abra y en áreas cercanas a ella, diversos autores determinaron que se trata de un complejo calcáreo de tipo plataforma. La Formación El Abra está constituida por una secuencia de calizas de color gris obscuro, de textura de grainstone oolítico, peletoides y restos biógenos a Wackstone, en estratos de gruesos a masivos (60-130 cm) de ambiente de plataforma con facies pos-arrecifal, su espesor se estima en más de 1500 m. Está expuesta en la porción centro y sur occidental del área; en gran parte de las sierras El Tablón y La Noria.

La edad de los sedimentos se determina sobre la base del fósil *Nummoloculina Heimi Bonet* del Albiano - Cenomaniano y se correlaciona con las Formaciones Tamabra, Cuesta del Cura y Tamaulipas Superior, su localidad tipo se ubica en el cañón de El Abra sobre la carretera Valles-Tampico, aproximadamente a 10 km al E de Ciudad Valles, S.L.P. Por su contenido faunístico se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano, se correlaciona con las Formaciones Tamabra, Cuesta del Cura y Tamaulipas Superior. La secuencia se depositó en facies de plataforma a lagunas de aguas tranquilas, bien oxigenadas y poco profundas y con estabilidad tectónica.

Formación Tamasopo (Ks-Cz). Turoniano-Santoniano

Se refiere a las calizas de la Cañada de Tamasopo, con un rango del Turoniano-Santoniano Inferior. Posteriormente en trabajos realizados por Petróleos Mexicanos, esta formación es dividida en dos miembros el Inferior y Superior.

Se trata de calizas con microfósiles de color gris claro, de estratificación media (0.80 m) con vetillas de calcita que no presentan direcciones preferenciales. Su espesor es variable, se considera de 300 a 400 m. Está expuesta en la porción norte y nororiente del área; y en menor proporción al sureste de en donde se manifiesta claramente una orientación preferencial NW-SE. Descansa concordantemente sobre la Formación El Abra subyaciendo de igual forma con la Formación Cárdenas.

El conjunto faunístico de esta formación lo ubica del Turoniano al Santoniano. Es correlacionable con la Formación San Felipe, con la parte media e inferior de la Caracol y con parte de la Soyatal.

Los sedimentos de esta formación fueron depositados sobre una plataforma en aguas someras y cálidas, con alta energía, alejadas de fuentes de material terrígeno.

Formación Cárdenas (Ks-lu). Campaniano-Maestrichtiano

Rocas arcillo-calcáreas que se encuentran aflorando en las cercanías de la estación del Ferrocarril Cárdenas, S.L.P., aplicándoles el nombre de "División Cárdenas".

Es una secuencia de lutitas de color gris a café amarillento, que intertemperiza a café ocre, en capas de 5-20 cm de espesor de grano fino a medio; intercalándose algunos horizontes de areniscas de grano fino color crema en estratos de 10 a 30 cm; su espesor varía de 80 a 100 m.

Está expuesta en la porción sur-oriental del área; en el Cordón de San Francisco y en menor proporción al noroeste. Cubre concordantemente a sedimentos de la unidad Tamasopo (Miembro Superior) y subyace en forma discordante a depósitos recientes y a derrames ígneos.

Por el contenido microfaunístico reportado, se le asigna una edad del Campaniano-Maestrichtiano. Se correlaciona con las formaciones Mezcala, Méndez y la parte alta de La Caracol.

La Formación Cárdenas es un depósito de tipo regresivo, los sedimentos que la constituyen son de aguas poco profundas y de alta energía. Las condiciones para el desarrollo de ciertos organismos marinos fueron apropiadas, no obstante presenta considerable aporte de material terrígeno.

Formación Soyatal. Turoniano.

Con el nombre de Formación Soyatal Wilson *et al*, 1955 definió a una sección de aproximadamente 150 m de espesor, de calizas de color gris oscuro, interestratificadas con lutitas calcáreas, de edad Turoniano, que afloran en la región de la porción media sur y suroriental de la cuenca de la Mesa Central. Su espesor promedio varía de 100 a 430 m. En la Sierra de Álvarez E. G. C. Serna la subdividió en las siguientes 3 unidades litológicas:

Unidad A: esta unidad es la inferior y está constituida aproximadamente 39 m de lutitas calcáreas filitizadas, calcarenitas y calcilutitas, en capas delgadas de color gris oscuro a violeta. Las calizas contienen escaso pedernal de color gris oscuro y negro. En la base se observan 10 m de conglomerado calcáreo.

Unidad B: de 60 m de espesor, consiste de calcilutitas y calcarenitas impuras, limosas y arcillosas, de color gris, en estratos delgados a medianos que están intercaladas con pequeñas cantidades de lutitas fosilíferas de color gris oscuro a pardo olivo y que contienen ocasionalmente fragmentos de plantas carbonizadas.

Unidad C: mide 75 m de espesor y consiste de calizas y lutitas, predominando estas últimas en la porción media inferior, mientras que las calizas y lutitas se presentan en proporciones iguales en la mitad superior. Las calizas son arcillosas y arcillo-arenosas, de color gris oscuro y violeta; las lutitas son de color gris oscuro.

Por su contenido faunístico y posición estratigráfica se le ha asignado al Turoniano y se puede correlacionar con los sedimentos de igual edad de la Formación Agua Nueva de la Planicie costera del Golfo de México. Su ambiente de depósito es de tipo Flysch en ambientes con fuertes pendientes, relacionados probablemente a sistemas de frente deltaico y de prodelta.

La Formación Soyatal es un depósito de tipo transgresivo, la presencia de clastos en forma de limos, arcillas, fragmentos de micas y calizas indican condiciones inestables en el área donde se originaron.

PALEÓGENO-NEÓGENO

Formación Andesita Casita Blanca (Tcb). Paleógeno (Eoceno)

Originalmente fue descrita informalmente con el nombre de Andesita, como roca de color gris a oscuro verdoso, de textura porfirítica y pilotáxica con 5% de fenocristales de 1 – 2 mm de biotita y plagioclasas, en una matriz afanítica, compuesta de un agregado de microlitos de plagioclasas y biotita, en su cima presenta abundantes vesículas rellenas de calcedonia y en la base presenta vetilla de calcita. Presenta un espesor estimado de 64 a 120 m.

Aflora como ventanas aisladas a una escala no cartografiada al oriente de la cuenca de S. L. P., en las inmediaciones de la sierra San Pedro. Sobreyace discordantemente a la Formación Caracol, Indidura y Cenicera y subyace con una topografía irregular a la Latita Portezuelos, Riolita San Miguelito e Ignimbrita Santa María.

La edad determinada por el método K/Ar es de 44.1 más menos 2.2 millones de años, que la ubica en el Eoceno Medio. Puede correlacionarse con las andesitas Paleoceno – Eoceno de Sinaloa y Zacatecas y con la andesita antigua en la secuencia volcánica de Durango.

Formación Ignimbrita Santa María (Tis). Paleógeno (Oligoceno)

Se considera su localidad tipo en los cerros ubicados al norte de la ciudad de Santa María del Río S. L. P. en donde se encuentra bien expuesta.

Consiste de una roca de color gris rosáceo, de textura porfirítica y eutaxítica, con 30-40% de fenocristales de 2-5 mm de cuarzo subhedral y sanidino euhedral, con magnetita alterada a hematita como mineral accesorio, en una matriz desvitrificada.

Se encuentra bien soldada y su característica distintiva es la presencia de numerosos fragmentos alargados de 2-15 cm, bien colapsados de pómez, quedando huecos al intemperizar la roca. En general tiene una estructura columnar y su espesor promedio se estima en 30 m.

Aflora al oriente de la zona, en los alrededores del Cerro de San Pedro. Sobreyace discordantemente a la Formación Cenicera al igual que la Formación Andesita Casita Blanca, su edad determinada por el método K/Ar es de 29.5 +/- 1.5 Ma, que la ubica en la parte baja del Oligoceno.

Conglomerado Polimítico (Tcgp)

Los depósitos son producto de la erosión de las diferentes unidades que conforman las sierras cercanas a cada afloramiento y varían según el tipo de roca que predomina en la localidad. Su composición predominante consiste de fragmentos de caliza y en menor proporción por rocas volcánicas de composición riolítica.

El tamaño comprende desde arenas, gravas y bloques de hasta un metro, que tienen como cementante una matriz arcillo-arenosa. No se conoce con exactitud el espesor de esta unidad pero se calcula que puede tener entre 15 y 100 m.

Está expuesta en la porción sur oriental y noroccidental de la comunidad de El Jabalí, las mejores expresiones las tenemos en los poblados La Loma, San Diego y al norte de San Isidro de Vigas. Se encuentra sobreyaciendo al paquete de rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno y a su vez está cubierta por depósitos de basaltos, conglomerados y depósitos aluviales más recientes.

En el área se le asigna una edad del Neógeno por su posición estratigráfica, posiblemente corresponda al Mioceno. Este depósito es de origen continental típico de una erosión muy intensa producto de la inestabilidad estructural, el material es arrastrado por los ríos para depositarse en la intersección de corrientes próximas a los valles.

Basalto (Qb)

Los basaltos son vesiculares de textura holocristalina intergranular, por lo general contienen olivino, el cual se altera a idingsita. En superficie fresca son de color gris oscuro, y cuando presentan intemperismo moderado muestran tonalidades rojizas.

La unidad incluye pequeños afloramientos de brechas volcánicas de la misma composición. A la unidad se le asigna provisionalmente una edad Cuaternario, pero podría ser de edad Paleógeno-Neógeno (?) y asociarse a un proceso de extensión. Está expuesta en la porción nororiental, suroriental y centro occidental.

CUATERNARIO

Conglomerado Polimíctico (Qcgp)

Como unidades sedimentarias continentales representativas del Cuaternario, se presentan conglomerados y aluvión. Los conglomerados presentan por lo general fragmentos constituidos de rocas sedimentarias que varían en tamaño desde unos cuantos centímetros hasta un metro, de forma redondeada a subredondeada, con cementante arcillo-arenoso. Se presenta mal consolidado. Sobreyace discordantemente a las rocas más antiguas, mayormente a las del Cretácico. Está expuesto principalmente al norte y oriente de la superficie que cubre el acuífero.

Aluvión (Qal)

El aluvión está formado por sedimentos aluviales de granulometría variada que se encuentran principalmente en los cauces de los ríos y arroyos, como producto de la erosión a que se encuentran sometidas las rocas y sedimentos del área. Su distribución es amplia en la porción central del área.

4.2. Geología estructural

Las mayores estructuras formadas durante la Orogenia Laramide constituyen las sierras Las Pilas, Los Librillos, Las Playas y Guadalcázar, siendo esta última la más importante y compleja.

La Sierra Las Pilas presenta una cabalgadura mayor en su frente oriental en donde la Formación El Abra se encimó tectónicamente sobre la Formación Cárdenas. La Sierra Los Librillos formada por varios conjuntos de pliegues de orientación NW-SE, formada por anticlinales y sinclinales ligeramente asimétricos.

La Sierra Las Playas es un anticlinorio complejo que en su parte norte presenta una imbricación dentro de la misma Formación El Abra, y en la oriental a la altura del poblado Núñez presenta una cabalgadura mayor donde la Formación El Abra está montada sobre los terrígenos de la Formación Cárdenas. La Sierra Guadalcázar es el conjunto montañoso que bordea el Altiplano El Realejo.

En la porción occidental aflora en forma de diapiros los yesos de la Formación Guaxcamá, que al ascender generaron fracturas radiales y concéntricas, reacomodando los estratos de la Formación El Abra y modificando la morfología y posición original de los pliegues Laramídicos.

Esta porosidad secundaria permitió el desarrollo de un carst muy intenso, que tras varios episodios de colapso generó la brecha que ahora ocupa la parte central de la sierra. Esta disolución diferencial ocasionó que se formara el altiplano central en esta zona, labrando subsiguientemente otras depresiones cársticas de dimensiones enormes que se conocen como los poljes de Guadalcázar-Abrego, La Trinidad, El Realejo, además de innumerables dolinas simples y compuestas.

La Sierra del Aguaje – Los Gavilanes adyacente a la Sierra de Guadalcázar en su parte suroeste, expone un patrón complejo de cabalgaduras de las cuales la del Aguaje es la de mayor expresión y parece ser la estructura frontal de un abanico “dúplex”, que incluye la cabalgadura de Pinos – San José de Las Flores y la de Villar.

La parte norte correspondiente a Guadalcázar fue una zona minera importante en el siglo pasado y principios del presente. Se encuentra dentro de la Región Minera de Guadalcázar, que se divide en el Distrito Minero Guadalcázar y en dos Zonas mineralizadas, Núñez y La Taponá.

4.3. Geología del subsuelo

Con base en la información hidrogeológica procedente de cortes litológicos, sondeos geofísicos y recorridos de campo, es posible identificar 2 unidades hidrogeológicas:

Unidades permeables

(Formaciones, El Abra, Tamasopo, Rocas Ígneas Extrusivas y Materiales Sedimentarios Continentales). Estas unidades permeables son las principales rocas que presentan la capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades económicamente explotables.

La Formación El Abra presenta permeabilidad por disolución de calizas, formando conductos preferenciales del agua subterránea, por tanto su grado de heterogeneidad y anisotropía son muy variables.

En cuanto a las rocas ígneas extrusivas, éstas se caracterizan por presentar cierto grado de permeabilidad que le confieren las diaclasas de enfriamiento; sin embargo, su extensión es muy limitada y se aloja entre el material sedimentario que la sepulta.

Por último, los Materiales Sedimentarios Continentales presentan una importante variación en su granulometría, propiedad que controla el comportamiento espacial de la permeabilidad de estas unidades.

Un aspecto importante, son los diversos abanicos aluviales que se entrelazan o interdigitan en la llanura aluvial, lo que explica la gran heterogeneidad y anisotropía del medio.

Unidades de escasa permeabilidad

(Formaciones Cárdenas, Soyatal, y Rocas Intrusivas). La primera se caracteriza por una alternancia de lutitas y areniscas de baja permeabilidad y la segunda corresponde a formaciones que se caracterizan por alternancia de estratos delgados de material arcilloso, frecuentemente con pedernal, muy comunes en ambientes sedimentarios marinos de cuencas profundas.

Medios Hidrogeológicos

Con base en las observaciones de campo e información bibliográfica de la geología del subsuelo, se lograron identificar tres medios físicos por donde circulan las aguas subterráneas: un medio de permeabilidad casi nula que separa estos medios y el basamento hidrogeológico que prácticamente sustenta y delimita a profundidad al sistema.

Medio granular. Como el nombre lo indica, se refiere al flujo de agua subterránea en material granular, que en este caso es la unidad Materiales Sedimentarios Continentales del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, que es la unidad litológica donde se emplazan la mayor parte de aprovechamientos de aguas subterráneas, principalmente agrícolas. Presenta heterogeneidad y anisotropía importantes.

Medio fracturado. Este tipo de medio es de gran importancia: i) por ser rocas que en superficie son fuertes potenciales de infiltración de agua meteórica y ii) porque en subsuelo son una componente fundamental en el movimiento del agua subterránea a profundidades que rebasan a la unidad Materiales Sedimentarios Continentales.

A este medio pertenecen las formaciones, El Abra, Tamasopo y Rocas Ígneas Extrusivas. Las Formaciones, El Abra, y Tamasopo consisten de rocas calizas que generalmente presentan permeabilidad por disolución y por el sistema de fracturamiento magnificado por los agentes erosivos que actuaron y que en rocas expuestas en superficie aún persisten.

En lo que a la unidad de Rocas Ígneas Extrusivas se refiere, éstas manifiestan diaclasas de enfriamiento, que facilitan el movimiento del agua subterránea, pero dada su extensión limitada, principalmente están en conexión hidráulica con el material sedimentario que la rodea.

Medio de muy baja permeabilidad. Las características de la Formación Cárdenas es la unidad que separa el sistema en forma no constante y transversal en toda la cuenca subterránea, por lo que en algunos aprovechamientos se considera con el funcionamiento de un acuífero confinado.

Basamento hidrogeológico. Se considera como basamento hidrogeológico a las rocas más antiguas hasta ahora identificadas en la región, la Formación Guaxcamá, la cual presenta baja permeabilidad y que en posiciones estratigráficamente normales son las más profundas, por lo que sustentan al sistema de aguas subterráneas y su dinámica a través de los materiales geológicos más jóvenes.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Considerando los diversos enfoques hidrogeológicos que se pueden tomar en cuenta a partir en las características litológicas de las unidades que afloran en la zona, y complementados con las observaciones de campo, se considera que las unidades estratigráficas establecidas previamente, forman un acuífero constituido en el medio granular que varía de libre a confinado. El funcionamiento del acuífero granular de tipo libre fue identificado en la región ubicada al noreste de Cerritos, mientras que en la región al sur y oriente de Villa Juárez las condiciones locales indican que los pozos tienen una respuesta hidráulica de acuífero confinado.

En el caso del medio fracturado que para las condiciones locales tiene una característica adicional de ser cárstico, la presencia de plegamientos y fracturamiento asociado, generan condiciones de respuesta hidráulica de acuífero libre.

Sin embargo; existe la posibilidad de que algunas regiones cuando el medio fracturado-cárstico subyace al medio de baja permeabilidad representado por la Formación Cárdenas su funcionamiento sería de acuífero confinado, pero actualmente no existe información de las regiones en donde se presenta esta condición.

5.2. Parámetros hidráulicos

Durante las actividades para el estudio de 2007, se realizaron seis pruebas de bombeo en la zona, tanto en etapa de abatimiento como recuperación, cuya duración varió de 10 a 30 horas.

En la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos de su interpretación con el método analítico de Neuman, y con el método numérico de Rathod y Rusthon.

Tabla 2. Interpretación de las pruebas de bombeo mediante los métodos analítico y numérico

CLAVE DE POZO	X	Y	Tipo de medio	Tipo de acuífero	PROF. (m)	Q medio (l/s)	Tiempo bombeo (min)
CNA 14-80	-100.189017	22.304936	granular	libre	100	12	1200
CNA14-107	-100.224083	22.214583	granular	libre	140	12	1200
CNA-14-57	-100.290118	22.423546	granular	confinado	150	12	647
CNA-14-56	-100.286015	22.418999	granular	libre	150	8	1200
CNA 14-16	-100.321663	22.400606	fracturado	libre	170	38	1685
CNA14-02	-100.243543	22.350412	granular	confinado	100	19.5	1800
CLAVE DE POZO	N E (m)	Abat. (m)	Tiempo total (min)	Espesor acuíf. (m)	Método analítico	K (m/s) Met. Analítico.	K (m/s) Met. Numérico
CNA 14-80	3.5	28.75	1800	95	Neuman	1.7×10^{-6}	4.6×10^{-6}
CNA14-107	4.72	30.74	1950	135	Neuman	1.2×10^{-6}	2.3×10^{-6}
CNA-14-57	63.3	39.39	6.47	85	Theis	8.8×10^{-7}	9.3×10^{-6}
CNA-14-56	71.53	20.2	1320	80	Neuman	1.6×10^{-6}	1.0×10^{-5}
CNA 14-16	63.985	24.975	1805	106	Neuman	4.2×10^{-6}	2.3×10^{-5}
CNA14-02	17.46	27.02	3000	60	Theis	1.0×10^{-5}	2.3×10^{-5}

Para las rocas calcáreas (medio fracturado) que se conoce como un medio muy productivo de agua subterránea, el valor definido es del orden de 10^{-5} m/s (0.86 m/día) que se ubica en el intervalo menor (0.1 a 2000 m/día) propuesto por Doménico y Schwartz, (1998) para calizas carstificada.

Para el caso del medio granular los valores de conductividad hidráulica identificados mediante la interpretación son del orden de 10^{-5} a 10^{-6} m/s (0.86 a 0.086 m/día) que corresponden aproximadamente a los valores propuestos para arenas finas y arenas arcillosas respectivamente.

Ninguna de las pruebas de bombeo pudo contar con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento.

Mediante el método numérico de Rathod and Rushton se estimó un rendimiento específico de 0.05, obteniéndose valores de transmisividad de 10^{-2} a 10^{-4} m²/s.

5.3. Piezometría

Se cuenta con información piezométrica para diferentes años comprendidos en el periodo 1983- 2007.

Para la descripción del comportamiento de los niveles del agua subterránea únicamente nos referiremos a las condiciones más recientes que corresponden al año 2007 y para la evolución se toma en cuenta el intervalo completo de tiempo.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad al nivel estático para 2007 (figura 3), muestra valores que varían de 5 a 90, que se incrementan conforme se asciende topográficamente.

Se aprecian valores mayores de 70 m en la zona de mayor extracción ubicada al sur de Villa Juárez, posiblemente relacionado con la explotación de unidades hidroestratigráficas más profundas.

En el área entre Villa Juárez y Cerritos las profundidades varían de 5 a 25 m aumentando estas hacia los flancos de las sierras, tanto al oriente como al poniente.

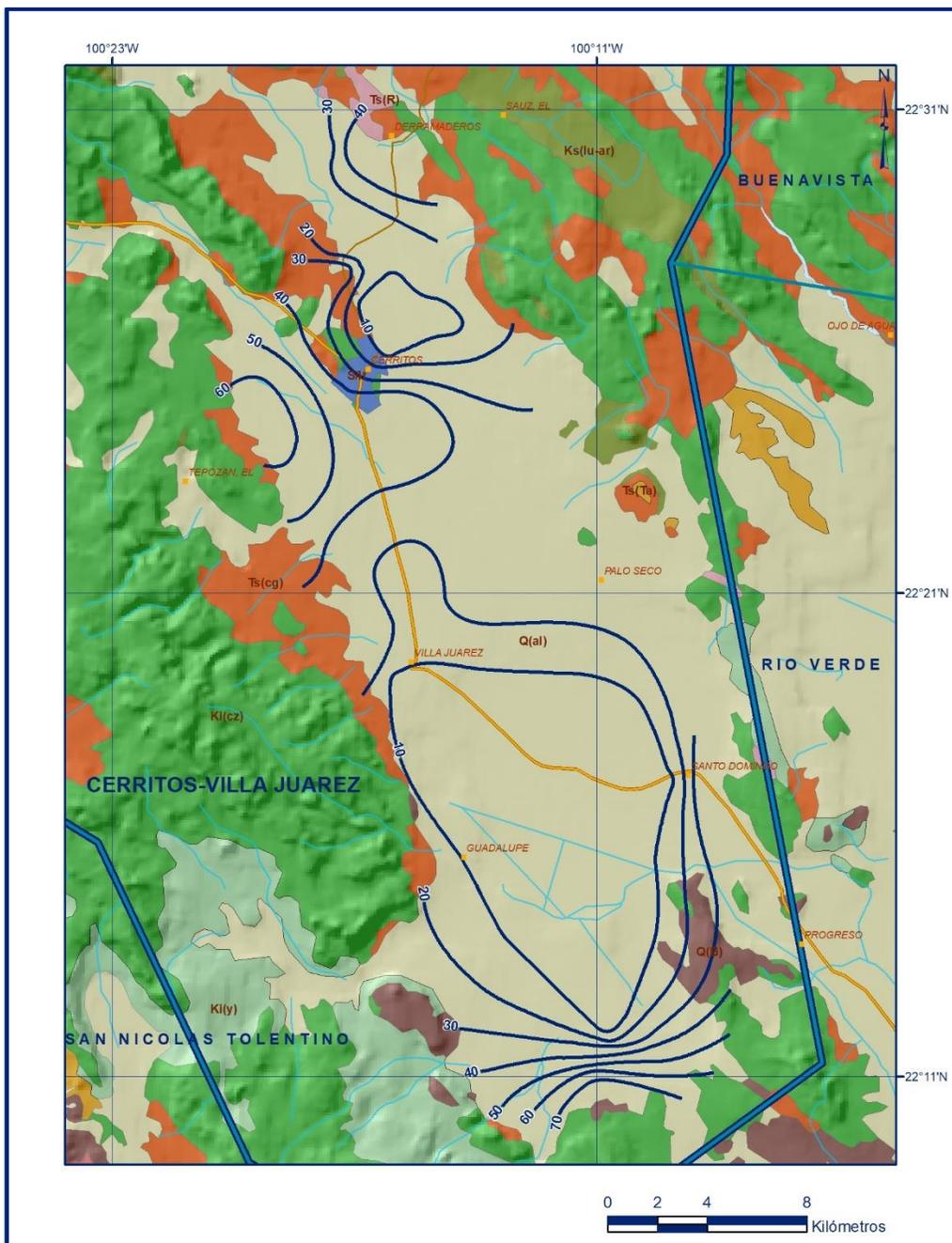


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2007).

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el 2007, mostrada en la figura 4, los valores varían por efecto de la topografía de 1150 a 1050 msnm, desde la porción norte del acuífero hacia el sureste. De esta manera, se puede identificar que la dirección preferencial del flujo subterráneo muestra una trayectoria de norte al sur, para la porción norte del acuífero, y de oeste a este para la porción sur.

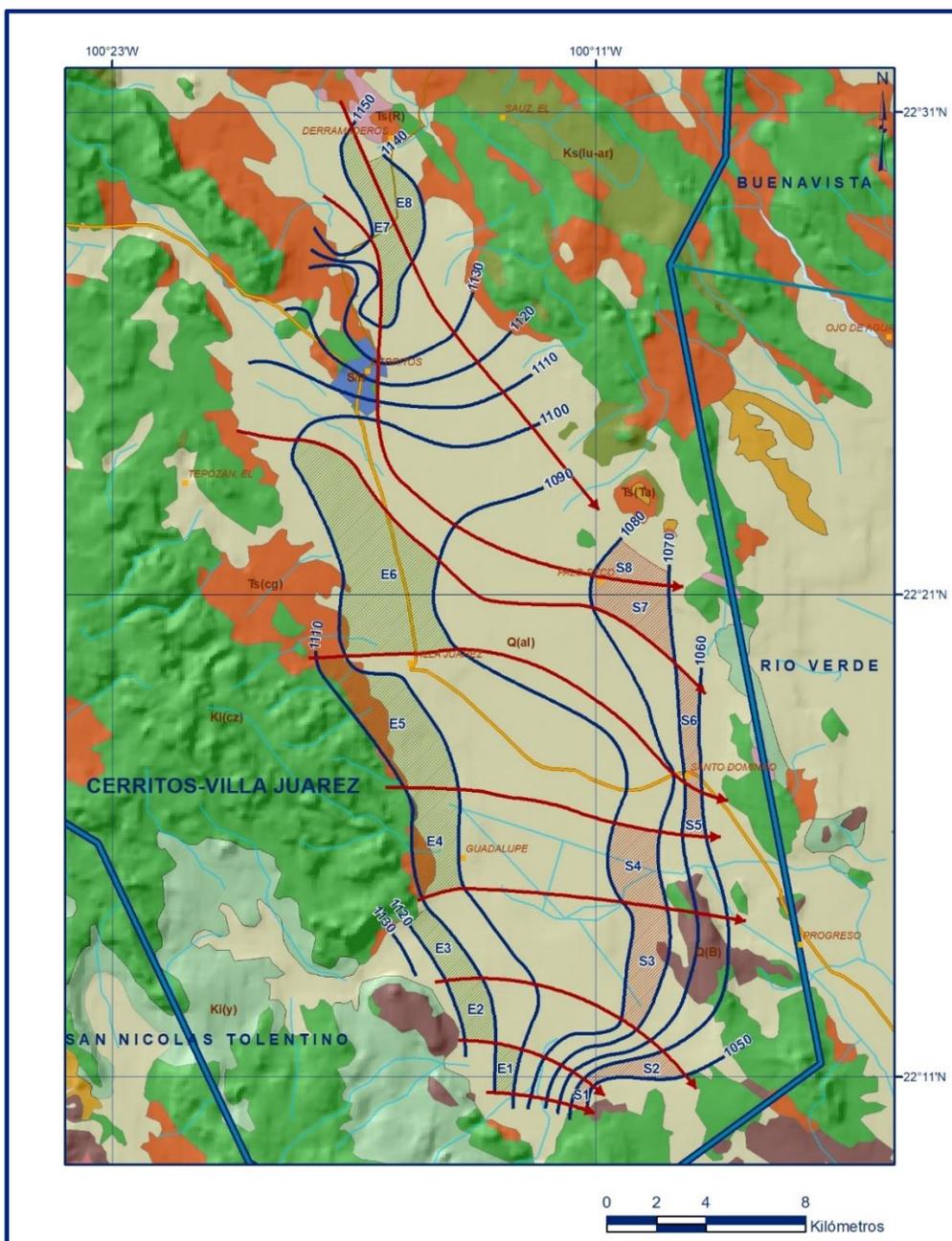


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2007).

5.4.3. Evolución del nivel estático.

Respecto a la evolución del nivel estático, la figura 5 presenta la configuración para el periodo 1983-2007, en la que se puede observar que se registran valores de abatimiento de 10 hasta 40 m, que representan un ritmo anual de 0.4 a 1.7 m. La zona en donde se identificaron abatimientos importantes, causados por concentración de bombeo, se ubica en las inmediaciones del poblado Cerritos.

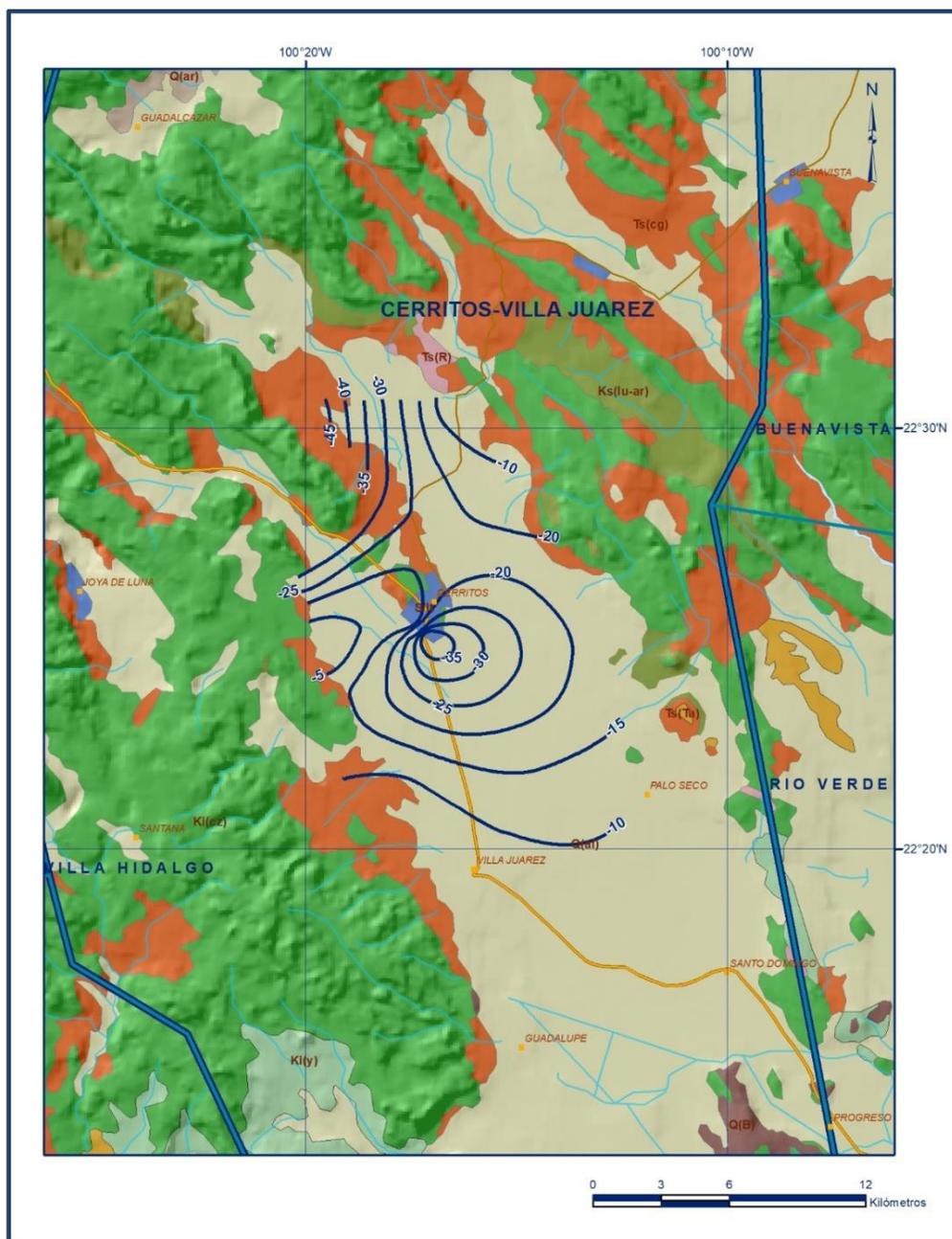


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (1983-2007).

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron muestras de agua en 61 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayores, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total, nitratos y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Disueltos Totales (SDT) varían de 245 a 2680 ppm.

La tabla 3 resume los principales resultados de los parámetros de campo y la tabla 4, muestra las principales especies químicas mayores determinadas en el laboratorio.

Tabla 3. Resultados de parámetros determinados en campo.

Datos de campo						
	Temp. °C	pH	CE (µS/cm)	Eh (mV)	ALCAL. TOT. (mg/l CaCO ₃)	O ₂ – disuelto (mg/l)
Media	21.88	6.7	1453	372,27	235	3.39
Min	14.9	6.4	458	-83	62	0.7
Max	28.7	8	4470	554	507	10.8

Tabla 4. Resumen estadístico de las principales características fisicoquímicas.

	ANIONES (mg/l)					CATIONES (mg/l)					ALCAL. TOT. (mg/l CaCO ₃)	DUREZA (mg/l CaCO ₃)
	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	Na	K	Ca	Mg	Sr		
Media	429,00	0,50	44,52	673,23	7,66	89,90	9,23	243,12	66,05	4,11	352,47	879,47
Mínimo	225,50	0,00	3,90	3,00	0,40	4,00	1,70	588,90	1,80	0,10	184,80	71,50
Máximo	751,50	25,40	426,50	1964,00	53,5	767,00	29,10	24,60	216,00	12,50	492,80	1834,30

De acuerdo a las familias del agua, predomina la sulfatada cálcica y bicarbonatada-cálcica. Los diagramas de Stiff permiten visualizar la trayectoria de flujo en relación con la composición química del agua subterránea. Se observa que existe recarga proveniente de las sierras ubicadas al noreste y noroeste, siguiendo su trayectoria hacia el centro del valle, para continuar hacia el sureste, donde se presentan diversas clases de agua que de acuerdo a los tipos de materiales presentes van cambiando su composición conforme aumenta la profundidad de los aprovechamientos. La composición química del agua cambia al circular a mayor profundidad, de sulfatadas a bicarbonatadas cálcicas.

Con respecto a la dureza del agua, las concentraciones varían de 71 a 1834 mg/l, la mayor parte de los aprovechamientos muestreados presenta concentraciones mayores a 500 mg/l, que considera la norma oficial como límite máximo permitido. Los sulfatos se encuentran en concentraciones altas en todo el valle.

Al igual que la dureza, sigue una tendencia consistente en todo el acuífero. Las concentraciones de nitratos superan el límite establecido por la norma oficial mexicana, los valores altos están asociados al mal manejo de residuos orgánicos animales y la utilización de aguas residuales para el riego. En el estudio de 2007, se reporta la presencia elevada del Arsénico en los pozos muestreados, preferentemente se asocia a aguas bicarbonatadas y aquellas asociadas con las partes someras del acuífero de tal forma que se pueden apreciar estas tendencias desde los manantiales hasta norias y pozos someros muestreados en el sur del valle.

Los aprovechamientos muestreados en el valle de Cerritos-Villa Juárez donde se observan dos tendencias, la gran mayoría de los aprovechamientos, presentan una calidad de agua muy altamente salina y con un bajo contenido en sodio.

En lo que respecta a los aprovechamientos para uso agrícola, se puede apreciar que la tendencia de la calidad del agua varía entre altamente salina a agua con salinidad media, aunque cuatro de los aprovechamientos muestreados presentaron agua con alto contenido de sodio, la mayoría de los aprovechamientos muestreados para uso agrícola tienen un agua altamente salina. Sin embargo todas las muestras son bajas en sodio.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

Los datos del censo del 2007 se presentan en la tabla 5, con un total de 158 aprovechamientos, de los cuales 65 son pozos, 85 norias, 7 manantiales y 1 Kanat, que es un sistema de pozos de pequeña profundidad y túneles construidos manualmente también conocidos como ghanats, que consisten de uno o más pozos localizados usualmente en la parte más alta y amplia de los abanicos aluviales, a lo largo de la periferia de las cuencas o desiertos interconectado con túneles los cuales conducen el agua por gravedad hacia un canal localizado en la parte más baja de la cuenca, (Bouwer, 1978), como se muestra en la figura 6.

De los pozos censados 47 son activos y 18 inactivos, repartidos en su uso como sigue: 13 potables, 28 agrícolas, 6 servicios varios. Norias activas son 74 y solo 11 inactivas, de acuerdo con su uso: 7 público-urbano, 32 agrícolas y 35 para usos varios: Los 7 manantiales son activos y se distribuyen en 2 público-urbano, 3 agrícolas y 2 para usos varios. En porcentaje representan el 50% el uso agrícola, 33% usos varios y 17% el 7 público-urbano.

Tabla 5. Censo realizado en el año de 2007.

Tipo de aprovechamiento	Número Total	Activos	Inactivos	Potable	Agrícola	Usos varios
Pozo	65	47	18	13	28	6
Noria	85	74	11	7	32	35
Manantial	7	7	0	2	3	2
Kanat	1	1	1	0	1	0

El volumen estimado de extracción conjunta asciende a **8.1 hm³ anuales**, de los cuales 5.4 hm³ (66.7%) se destinan a las actividades agrícolas, 2.1 hm³ (25.9 %) para abastecimiento de agua potable y los 0.6 hm³ restantes (7.4%) para otros usos.

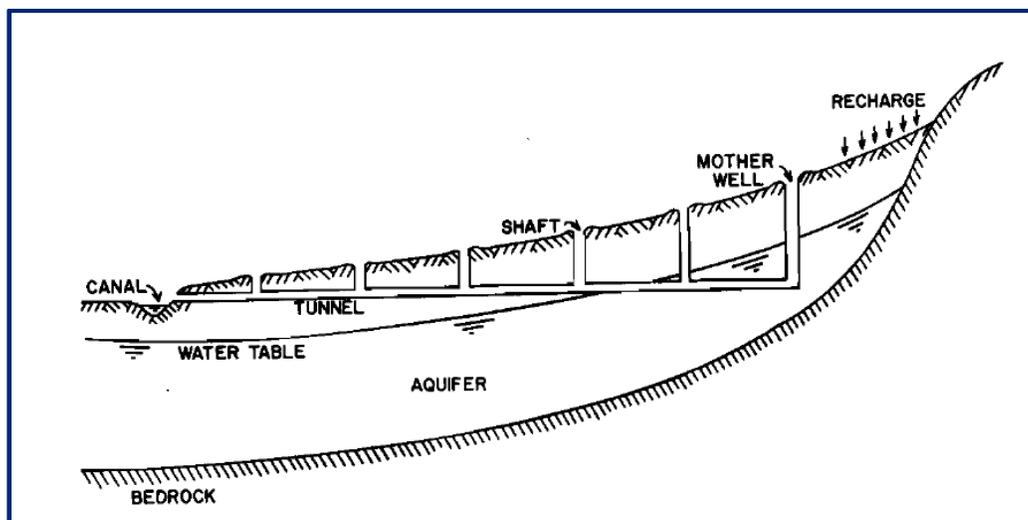


Figura 6. Esquema de un Kanat.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 1983-2007, en un área de balance de 421.65 km², en la que están dispersos los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

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

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

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

7.1. Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas (R_{pu}), constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes solo se considera la recarga inducida por el riego.

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

$$E_h + R_v + R_i - B - S_h - D_m = \pm \Delta V(S)$$

Dónde:

E_h : Entrada por flujo subterráneo horizontal

R_v : Recarga vertical

R_i : Recarga inducida

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal

D_m : Salidas a través de manantiales

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + Sh + Dm \pm \Delta V(S) - E_h - R_i$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado. La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

$$Q = T * B * i$$

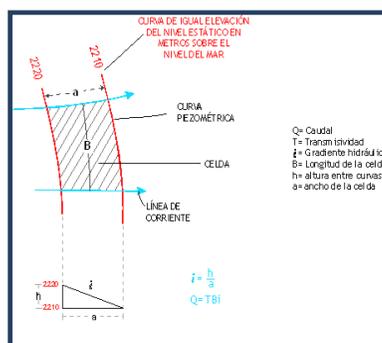
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



De acuerdo con la configuración del nivel estático para el año 2007, mostrada en la figura 4, las celdas de flujo de entrada de acuerdo a la geología, quedaron consideradas al poniente y norte de la zona del acuífero, su valor total asciende a **64.7 hm³ anuales**, como se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2007).

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	2500	1200	10	0.0083	0.0050	0.1042	3.3
E2	2200	1000	10	0.0100	0.0050	0.1100	3.5
E3	4100	1100	10	0.0091	0.0100	0.3727	11.8
E4	4000	1100	10	0.0091	0.0100	0.3636	11.5
E5	5500	1400	10	0.0071	0.0100	0.3929	12.4
E6	9500	1300	10	0.0077	0.0050	0.3654	11.5
E7	8000	1200	10	0.0083	0.0050	0.3333	10.5
E8	3000	2000	10	0.0050	0.0005	0.0075	0.2
TOTAL						64.7	

7.1.3. Recarga inducida (Ri)

La recarga vertical en el valle incluye tanto la recarga natural por lluvia que se precipita en el valle y por los escurrimientos superficiales, como a la recarga inducida por retornos de riego y fugas en los sistemas de distribución de agua potable y red de alcantarillado de las poblaciones.

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.

Para este caso, se consideró que un 15% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a los 40 m y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo.

Considerando que para el uso agrícola se destina un volumen de 18.0 hm³ anuales, de los cuales 5.4 provienen son agua subterránea y los 12.6 restantes de agua superficial de manantiales. De esta manera, el valor de la recarga inducida asciende a $18.0 * 0.15 = 2.7$.

La recarga por fugas de agua potable se calculó de acuerdo con la metodología propuesta por IMTA (1999) que considera el volumen que se extrae para uso de agua potable dentro del área de explotación y un coeficiente de fugas y recarga estimado, en el cual de acuerdo con las características de las poblaciones (tamaño, tipo de clima, entre otras), propone un coeficiente de 15%. Quedando asú un valor para la recarga vertical por fugas agua potable = $(2.1 \text{ hm}^3/\text{año} \times 0.15) = 0.3$. Por lo tanto, la recarga inducida representa un valor de **Ri = 3.0 hm³/año**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), en una pequeña región por flujo horizontal subterráneo (Sh) y por la descarga a través de manantiales (Dm).

7.2.1. Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el aparatado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **8.1 hm³/año**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático (figura 4) y aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas. El espesor saturado (b) fue estimado de acuerdo a la información de las secciones hidroestratigráficas. El detalle del cálculo de la celda se muestra en la tabla 7, donde el resultado indica que el volumen total de salidas subterráneas asciende a **14.2 hm³/año**.

Tabla 7. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2007).

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1000	500	10	0.0200	0.0010	0.0200	0.6
S2	3000	500	10	0.0200	0.0050	0.3000	9.5
S3	5000	1400	10	0.0071	0.0010	0.0357	1.1
S4	2500	1100	10	0.0091	0.0010	0.0227	0.7
S5	2000	700	10	0.0143	0.0010	0.0286	0.9
S6	2500	1000	10	0.0100	0.0010	0.0250	0.8
S7	1200	1200	10	0.0083	0.0010	0.0100	0.3
S8	2500	3500	10	0.0029	0.0010	0.0071	0.2
TOTAL							14.2

7.2.3. Salida a través de manantiales (Dm)

Las principales manifestaciones de descarga se encuentran asociadas con los manantiales Puerta del Río, Buenavista, La Cueva y Ojo de León. Adicionalmente, existe flujo base en el Río San Tiburcio. El aforo de estos caudales, realizado mediante diferentes métodos como sección y velocidad, dilución de trazador (cloruro de sodio) y molinete, durante el estiaje, arrojó como resultado un caudal de 1600 l/s, de los cuales 1500 corresponden al río San Tiburcio y los 100 lps restantes provienen de los manantiales. Por lo tanto, el volumen de descarga es de **50.4 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

De acuerdo con la información obtenida el cambio, en el almacenamiento es muy pequeño, debido a que los abatimientos se localizan en una pequeña zona ubicada en las inmediaciones de Cerritos, considerando un rendimiento específico de 0.05 obtenido mediante el modelo numérico de Rathod and Rushton.

Para el resto de la superficie del acuífero, no se registran cambios importantes en la posición de los niveles del agua subterránea. Por estas razones, para fines del balance, se considera que el cambio de almacenamiento es nulo. $\Delta V(S) = 0$

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical, despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 8.1 + 14.2 + 50.4 + 0.0 - 64.7 - 3.0 \\ R_v &= 5.0 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 5.0 + 64.7 + 3.0 \\ R &= 72.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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 **72.7 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que 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 **DNC = 50.4 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **17,663,375 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 72.7 - 50.4 - 17.663375 \\ \text{DMA} &= 4.636625 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,636,625 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1983. Estudio Geohidrológico de la Zona de Cerritos y Guadalcázar, Estado de San Luis Potosí. Realizado por la empresa ROASA.