

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero San Fermín (1015),
Estado de Durango***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CCCLXXV REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE"

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					

ESTADO DE DURANGO

1015	SAN FERMÍN	7.5	0.0	0.625918	0.4	6.874082	0.000000
------	------------	-----	-----	----------	-----	----------	----------

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO SAN FERMÍN (1015), ESTADO DE
DURANGO***

México, D.F., Diciembre de 2010

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	1
Antecedentes	1
1.1. Localización	1
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	3
3. FISIOGRAFÍA.....	3
3.1. Provincia fisiográfica.....	3
3.2. Clima	4
3.3. Hidrografía.....	5
3.4. Geomorfología.....	5
4. GEOLOGÍA.....	5
4.1. Estratigrafía	6
4.2. Geología estructural	9
4.3. Geología del subsuelo.....	10
5. HIDROGEOLOGÍA	11
5.1. Tipo de acuífero.....	11
5.2. Parámetros hidráulicos.....	11
5.3. Piezometría	11
5.4. Comportamiento hidráulico	12
5.4.1. Profundidad al nivel estático	12
5.4.2. Elevación del nivel estático	12
5.4.3. Evolución del nivel estático	13
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	15
7.1. Entradas	15
7.1.1. Recarga vertical.....	16
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	16
7.2. Salidas	18
7.2.1. Salidas por flujo subterráneo horizontal	18
7.2.2. Evapotranspiración (ETR)	18
7.2.3. Bombeo (B)	19
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	19
8. DISPONIBILIDAD.....	20
8.1. Recarga total media anual (R_t)	21
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	21
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS).....	21
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	21
9. BIBLIOGRAFÍA.....	22

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

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 San Fermín, definido con la clave 1015 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el extremo norte del estado de Durango, entre los paralelos 26°04'30" a 26°30'30" de latitud norte y los meridianos 104°29'30" a 105°08'30" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1807 km².

Colinda al norte con los acuíferos Jiménez-Camargo y Escalón, que pertenecen al estado de Chihuahua; al sur colinda con los acuíferos La Zarca-Revolución y Revolución, al este con el acuífero Ceballos y al oeste con el acuífero Torreón de Cañas, todos ellos pertenecientes al estado de Durango (figura 1).

Geopolíticamente se localiza totalmente en el municipio de Hidalgo.

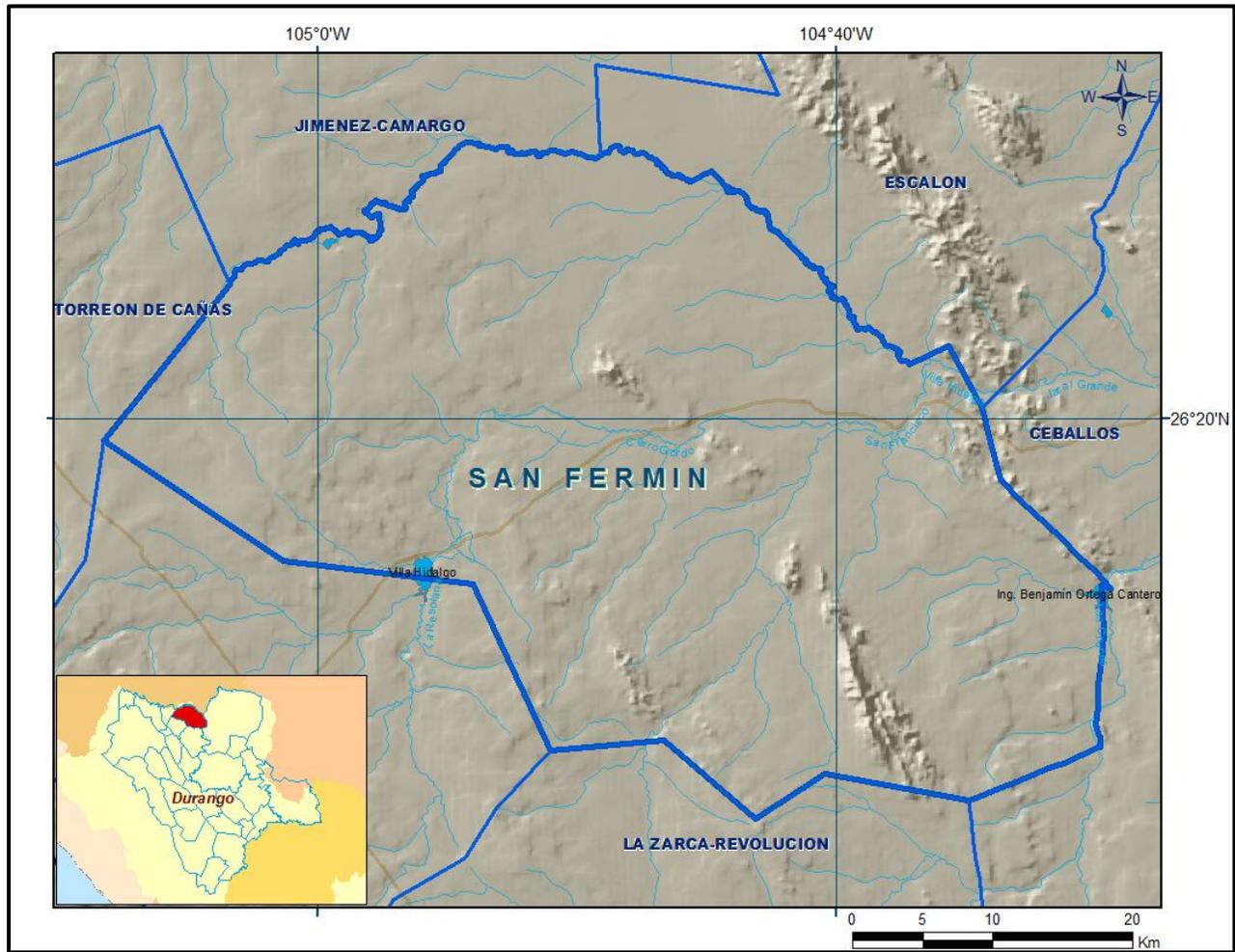


Figura 1. Localización del acuífero San Fermín

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 1015 SAN FERMÍN							
VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	34	24.5	26	20	22.5	Del 1 al 2 por el límite municipal
2	104	34	56.5	26	5	17.2	
3	104	40	28.2	26	6	18.5	
4	104	43	7.4	26	4	33.7	
5	104	46	40.1	26	7	35.8	
6	104	51	0	26	7	11.5	
7	104	53	59.5	26	13	38	
8	105	1	19	26	14	31.1	
9	105	8	11.8	26	18	8.9	
10	105	3	22.2	26	25	8.8	Del 10 al 11 por el límite estatal
11	104	49	6.1	26	30	8.9	Del 11 al 1 por el límite estatal

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero San Fermín pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Durango. En el territorio completo del acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2010, el municipio de Hidalgo se localiza en la zona de disponibilidad 7. El principal usuario es agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, sólo algunos con fines de prospección minera. En algunos acuíferos vecinos del estado de Chihuahua se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CABRERA-OCAMPO, MATALOTES-EL ORO, SAN JOSÉ DE NAZARENO, GALEANA-EL QUEMADO, LA VICTORIA, BUENOS AIRES, TORREÓN DE CAÑAS, SAN FERMÍN, SAN JUAN DEL RÍO, CABRERA, LA ZARCA-REVOLUCIÓN Y REVOLUCIÓN, EN EL ESTADO DE DURANGO, elaborado en convenio por la Universidad de Sonora (UNISON), para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El acuífero San Fermín se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte, Subprovincia del Bolsón de Mapimí. La provincia está constituida por sierras bajas y abruptas con

elevaciones entre 1590 a 1950 m.s.n.m. con orientación nornoroeste-sursureste separadas por grandes bajadas y llanuras rellenas de material aluvial, presentando un drenaje interno.

La zona donde se localiza el acuífero muestra un estado de erosión avanzado con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, también llamados bolsones.

La subprovincia está constituida por extensas llanuras aluviales o salinas, con lomeríos ramificados, sierras plegadas y campos de dunas. En las llanuras dominan suelos profundos de origen aluvial o lacustre, de textura media o fina.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el clima que predomina en todo el acuífero es el seco estepario (BS), que se presenta en las variedades de BS₁kw(w), BS_okw(w) y BS_ohw(w). Estas se manifiestan en franjas orientadas con dirección de nornoroeste a sur-sureste abarcando todo el acuífero, de oeste a este en el orden que fueron citadas.

En los primeros dos casos, se presenta una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la media mes más frío se encuentra entre -3 y 18 °C y la del más cálido es > 18 °C, mientras en el clima BS_ohw(w), la temperatura media anual se presenta entre 18 y 22 °C, y la del mes más cálido <18 °C. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año indicando la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en todos los casos es de verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término [(w)] indica que el porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) en estos climas es < 5.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de junio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. En los meses de enero y diciembre se registra la menor temperatura media, con 9.6 y 10.2°C, respectivamente.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de tres estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Villa Hidalgo, Agua Puerca y El Mirador, cuyo registro comprende los periodos 1975-2007, 1979-2006 y 1979-2006, respectivamente. Con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **361.6 mm y 16.8 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2503.6 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

El acuífero San Fermín está ubicado en la Región Hidrológica 35 Mapimí, Cuenca del Arroyo Cerro Gordo y Otros. Esta Región se encuentra situada al norte del país, en la altiplanicie septentrional; ocupa porciones de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango. Está comprendida entre los meridianos 102°00' y 105°06' de longitud oeste, y los paralelos 25°37' y 28°43' de latitud norte. El área de esta región es de 56,883 km²; limita al norte y oriente con la región hidrológica 24b, al occidente la región hidrológica 24a, al sureste con la región hidrológica 24c, y al sur con la región hidrológica 36. La hidrografía está constituida por arroyos secos prácticamente todo el año, existiendo algunas lagunas como Palomas, el Rey, el Coyote, el Zorrillo y la Leche, de los cuales, la única perenne es Palomas.

Localmente los arroyos principales son el Cerro Gordo (continuación del arroyo La Resolana como se conoce en el Acuífero Revolución) y San Francisco. En su territorio se localizan dos presas: Villa Hidalgo, ubicada en el extremo occidental en el límite con el acuífero Revolución, y la presa Ingeniero Benjamín Ortega Cantero (o Agua Puerca como también se le conoce), localizada en la porción suroriental del acuífero, en su límite con el acuífero Ceballos.

3.4. Geomorfología

El relieve se caracteriza por presentar sierra aisladas, angostas y alargada en sentido NW-SE y lomeríos suavemente ondulados cuya orientación general varía de S-N a NW-SE, con valles intermontanos y desniveles máximos de 800 m. La elevación mínima corresponde a 1350 msnm en la Cuenca Cañada Honda, y la máxima en la Sierra de Atotonilco con 2200 msnm.

Existe en el paisaje sierras plegadas que se encuentran enclavadas en una extensa planicie. Esta sierras son bajas y estrechas, con valles intermontados orientados en sentido NW-SE, ligeramente arqueadas y con altitudes de hasta 2150 msnm. La zona de la planicie, donde es común la acumulación de aluviones, presenta taludes que forman pie del monte. El área presenta rasgos de madurez morfológica en su última etapa. Los tipos de drenaje varían de subparalelo a angular principalmente, en la región oeste de anular-paralela que vierten a los valles y la región suroccidental presenta un drenaje radial.

4. GEOLOGÍA

Las rocas y secuencias que afloran en el área cubierta por el acuífero presentan una complejidad litológico-estructural muy importante, cuyo origen está asociado a diversos procesos geológicos que se han sucedido en esta porción de la República Mexicana. Es importante establecer que el estado de Durango se ubica morfo tectónicamente justo en la transición entre el dominio geográfico de la Sierra Madre Occidental y el dominio geográfico de la Plataforma Coahuila (López-Ramos, 1981;

Eguiluz de Antuñano y Campa-Uranga, 1982). En este contexto, las litologías presentan una mezcla de evidencias geológico-estructurales que obedecen principalmente a la sobreposición de diversos ambientes tectónicos.

En el extremo centro-norte del acuífero afloran rocas sedimentarias de tipo areno-calcareas, depositadas durante el Triásico. En el extremo suroriental se emplazan rocas ígneas extrusivas de composición riolítica que se emplazaron durante el Jurásico Superior (figura 2).

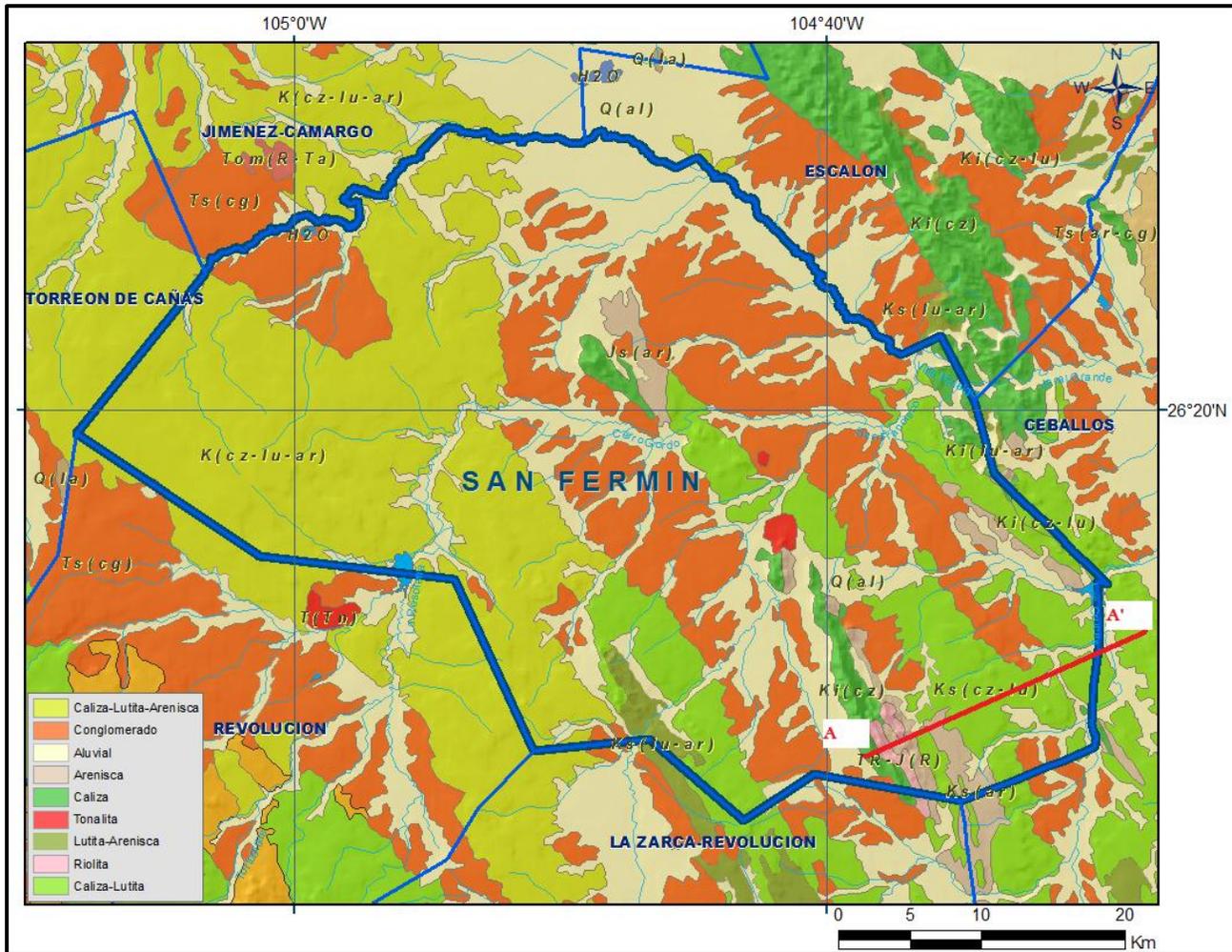


Figura 2. Mapa geológico del acuífero

4.1. Estratigrafía

Por las características litológicas y estructurales observadas en campo, es posible hacer la separación de las Cuencas Mezcalera, ubicada en la porción occidental, y Mesozoica ubicada en la porción oriental, las cuales se caracterizan por presentar litologías y estilos de deformación particulares (Carta Geológica-Minera G13-B82 "Atotonilco", SGM, 2002). A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área de la más antigua a la más reciente:

Triásico-Jurásico

Formación Nazas

El basamento de la región está constituido por la Formación Nazas (Clemons R.F. y McLeroy D.F., 1965), conformada por derrames andesíticos con intercalaciones de limolita, riolita e ignimbrita que afloran en la suroriental del acuífero. De acuerdo con las dataciones radiométricas por los métodos K/ar y Rb/Sr, realizados por Grajales N.M. y colaboradores (1992), su edad corresponde al Triásico Superior-Jurásico Inferior.

Jurásico Superior

Formación La Gloria

Sobreyaciendo discordantemente a la unidad anterior, se presenta un paquete de rocas jurásicas que corresponde a la Formación La Gloria, la cual en la región está dividida en tres miembros: el inferior corresponde a una secuencia arenosa, el medio a una secuencia areno-calcareá y el superior está conformado únicamente calcárea. Tomando en cuenta los estudios paleontológicos realizados por Contreras M.B. y Colaboradores (1988), se le asigna una edad correspondiente al Jurásico Superior (Oxfordiano-Kimmeridgiano).

Formación La Casita

Consiste de una secuencia de areniscas y lutitas que afloran en la porción suroriental del acuífero, al suroeste del Rancho La Parrita.

Cretácico Inferior

Formación Mezcalera

Es la unidad más antigua y está representada por una alternancia rítmica tipo flysch de areniscas y lutitas, cuyos afloramientos principales se localizan en las porciones nororiental y oriental del acuífero. Litológicamente está constituida por una secuencia rítmica de areniscas de grano fino y lutitas intercaladas con horizontes gruesos de calizas y limolita. Como cambio de facies de esta secuencia, se presentan rocas calcáreas de la Formación Aurora (KaCz-Lu), constituida por calizas, dolomías, pedernal y horizontes arcillosos, que afloran ampliamente en las sierras que conforman los límites oriental y occidental del acuífero, en forma de anticlinales. Sobreyaciendo discordantemente a la Formación Mezcalera se presenta una secuencia calcárea de edad Albiano. En la Cuenca Mesozoica se lleva a cabo un cambio de facies con la Formación Taraises, la cual consiste de una secuencia de calizas y lutitas. Sobreyaciendo discordantemente a esta formación, se presenta la Formación Caracol, la cual consiste de una secuencia de areniscas y lutitas. Durante el Cretácico Superior, se presenta una intrusión de un cuerpo de composición diorítica a granodiorítica, que afecta a las unidades descritas.

Formación Aurora

El nombre Formación Aurora fue propuesto por Burrows (1910) para aquellas rocas que afloran en la porción noreste del estado de Chihuahua, que están constituidas por capas gruesas de calizas

fosilíferas, que presentan abundantes nódulos de pedernal. Está constituida por calizas de estratificación media a gruesa con diversos desarrollos arrecifales y algunos horizontes de calcarenitas. Presenta una coloración de tonalidad gris a oscura, escasos nódulos de pedernal y hematita hacia la cima. Presenta fracturamiento general que varía de moderado a intenso, estructuralmente forma pliegues anticlinales cuyo eje se orienta al noroeste-sureste y echados suaves más o menos uniformes.

Eoceno-Oligoceno

Formación Ahuichila

Definida formalmente por Rogers (1981), en los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas, está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenitas, calculadita y de rocas volcánicas, con matriz calcárea y limo lítica, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris al rojizo. Debido a su posición estratigráfica y su origen, el cual se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia Laramie, su edad se considera del Eoceno-Oligoceno. Durante el Oligoceno Superior, se presenta un cuerpo volcánico correspondiente a un pórfido que se encuentra afectando directamente al miembro medio de la Formación La Gloria.

Mioceno-Plioceno

Formación Santa Inés (Tm Cgp)

Fue propuesto por E. de la Vega (1968) para designar a depósitos clásticos continentales que afloran al surponiente y suroriente de Cuencamé, Durango, con un espesor de 5 a 30 m. Consiste de clastos de roca volcánica ácida subredondeados a subangulosos del tamaño de guijas finas a cantos rodados medianos que varían de no consolidados a bien cementados, en una matriz de grava y arena. La litología consta de fragmentos líticos de rocas volcánicas ácidas como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e ignimbritas con un grado de esfericidad de subredondeado a subanguloso, mal clasificados, con diámetros variables de 1 a 40 cm, semicompactos a cementados en una matriz arenosa, constituyendo en ocasiones estratificación mientras que en otros sitios se encuentran en forma caótica. Por la similitud litológica y relación estratigráfica que se aprecian, estos depósitos se correlacionaron con la Formación Los Llanos, asignándole una edad al Plioceno Tardío.

Holoceno

Aluvi3n (Qhoal)

Constituyen grandes acumulaciones de material de origen fluvial, producto de la intensa erosión de las formaciones volcánicas Terciarias y Cuaternarias con su posterior transporte y depósito, lo cual ha originado la formación de extensas planicies aluviales y lacustres. Están formando por clásticos subredondeados a redondeados con un rango granulométrico muy amplio de gravas a arcillas. Se le ha asignado a esta unidad una edad del Cuaternario Holoceno.

4.2. Geología estructural

El origen de las estructuras identificadas se pueden atribuir a dos procesos principales, uno de compresión y otro de distensión; el primero ocurrió a mediados y finales del Cretácico y el segundo durante el Paleógeno que generó Cuencas y Sierras. Se presentan estructuras producto de deformación dúctil, representadas por las foliaciones de rumbo NW-SE con inclinación al suroeste y noreste, que se presentan en las rocas sedimentarias de la Formación Mezcalera, en las que el plegamiento de las foliaciones genera una serie de micropliegues muy cerrados.

Los eventos tectónicos de los que se tiene registro para este rango de edades en la región corresponden principalmente a aquellos relacionados con: a) el desarrollo de una cuenca mesozoica asociada a la apertura del Golfo de México (Rueda-Gaxiola, 2004), b) un proceso de subducción a lo largo de la margen pacífica de Norteamérica desde el Mesozoico y hasta el Cenozoico Tardío (Ferrari et al., 2005), c) la presencia de un evento compresivo en el marco de un ambiente de retro-arco a finales del Cretácico e inicios del Terciario (Eguiluz de Antuñano et al., 2000), y d) la distensión cortical asociada a la provincia extensional del *Basin and Range* (Henry y Aranda-Gómez, 1992).

Las deformaciones generadas como consecuencia de la subducción de la Placa del Pacífico Oriental, que se manifestó en el margen occidental de México hacia el oriente, generó esfuerzos compresivos de W-SW a E-NE, iniciando la denominada Orogenia Laramide desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno Tardío en varios episodios, (Araujo y Arenas, 1983); las rocas fueron comprimidas casi perpendicularmente contra la paleopenínsula de Coahuila, resultando una serie de pliegues angostos y alargados con dirección NW-SE en la región. Con la culminación de esta orogenia finaliza la deformación compresiva, y se desarrolla el vulcanismo riolítico de la Sierra Madre Occidental (Demant y Robin, 1975). Posteriormente se genera un periodo distensivo que originó una serie de fosas y pilares, acompañada con la erosión consecuente de las rocas deformadas que dieron origen a los depósitos continentales.

Los dominios estructurales son de tipo dúctil-frágil y frágil; el primero se observa en las formaciones constituidas por secuencias de calizas y lutitas, mientras que el dominio frágil se manifiesta en las secuencias calcáreas, arenosas y calcáreo-arenosas. Se observan dos efectos de deformación, uno de ellos corresponde a las estructuras anticlinales y sinclinales que fueron afectados por fallas y de desplazamiento y cabalgaduras, originados por los esfuerzos de compresión que ocurrieron a finales del Cretácico y principios del Terciario durante la Orogenia Laramide.

Otro evento de deformación corresponde a una fase tectónica extensional representada por fallamiento normal y lateral orientado NW-SE y NE-SW) que se llevó a cabo del Oligoceno Tardío a Mioceno Temprano, asociada a la apertura del Golfo de California y manifestada por una serie de fallamientos normales de tipo transtensional dextral a lo largo del margen pacífico en el noroeste y sinistral en el sureste de México que dieron origen a la provincia morfotectónica de Cuencas y

Sierras (Basin and Range). Se presentan estructuras anticlinales y sinclinales abiertas y recumbentes, cabalgaduras, fallamientos normales y laterales.

En la porción occidental, en la sierra de Atotonilco se observan dos cabalgaduras importantes, la primera denominada Cabalgadura Atotonilco, está orientada en sentido NW-SE y vergencia hacia el SW, mientras que la segunda se denomina Boquilla de Fernández-Bellavista, está orientada NW-SE con vergencia al NE. Es importante mencionar que entre dichas estructuras se presenta un anticlinal recumbente (denominado Atotonilco) el cual está orientado NW-SE y verge al SW.

En la porción suroriental se presenta la Sierra Agua Puerca, que es un anticlinal recumbente, orientado NW-SE con vergencia al NE, el cual es afectado por la falla sinistral Agua Puerca y al oriente de ésta se presenta la Cabalgadura Lomas Las Cuatas, la cual está orientada NW-SE, con vergencia al SW, misma que en su porción sur es afectada por la falla dextral El Caracol.

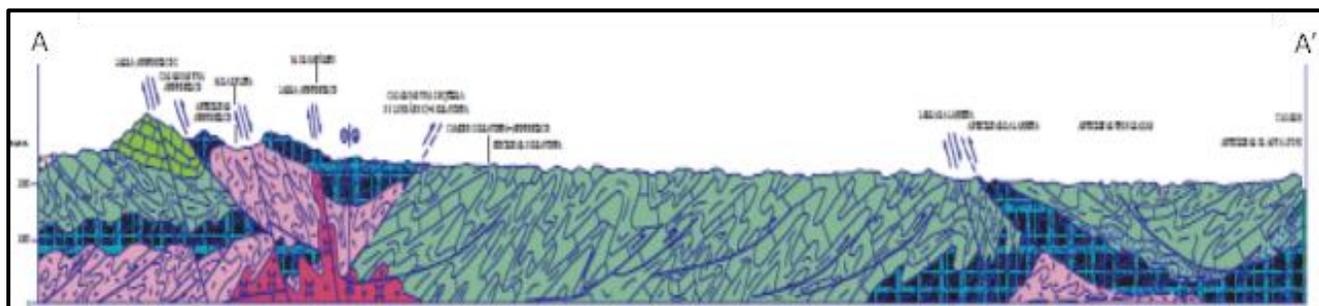
También se infiere la cabalgadura San Felipe, propuesta por Eguiluz A.(1988), la cual presenta una orientación NW-SE y verge al NE, así como dos cabalgaduras principales (Acebuches y Ceja Colorada), las cuales están orientadas NW-SE con vergencia al SW. En la porción sur se presenta la Fosa Santo Domingo-La Parrita, la cual está limitada por fallas normales y laterales.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho de los arroyos así como en los depósitos de conglomerados. Este es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias terrígenas (areniscas y lutitas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas areniscas y lutitas, al desaparecer el fracturamiento, y a mayor profundidad las lutitas que forman parte de la secuencia que constituye la Formación Mezcalera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución Laramídica (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-B82 "Atotonilco" Esc. 1:50.000 (SGM, 2002)

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero de tipo libre** en los sedimentos aluviales y conglomerados, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro de los valles, principalmente los de origen tectónico.

La porción inferior puede alojar un acuífero **de tipo confinado a semiconfinado** en las areniscas y lutitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Su espesor confinante está constituido por lutitas interestratificadas con calizas.

A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado y que puede estar confinado por la presencia de lutitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

En el territorio que cubre el acuífero no se han realizado pruebas de bombeo para la determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero. En el estudio realizado en el 2010, no fue posible realizar pruebas de bombeo, debido a que los aprovechamientos censados están equipados con Papalotes, los cuales no son aptos para efectuar la prueba de bombeo. Sin embargo por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos, cuyo origen y evolución geológica son los mismos, es posible asignar valores de transmisividad de **0.3 a $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** .

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 4, presenta valores que varían desde algunos metros, a lo largo de cauce de los arroyos Cerro y San Francisco que descienden del límite occidental del acuífero, hasta los 40 m, aumentando gradualmente hacia las estribaciones de las sierras, conforme se asciende topográficamente. Las mayores profundidades se presentan en el extremo oriental del acuífero.

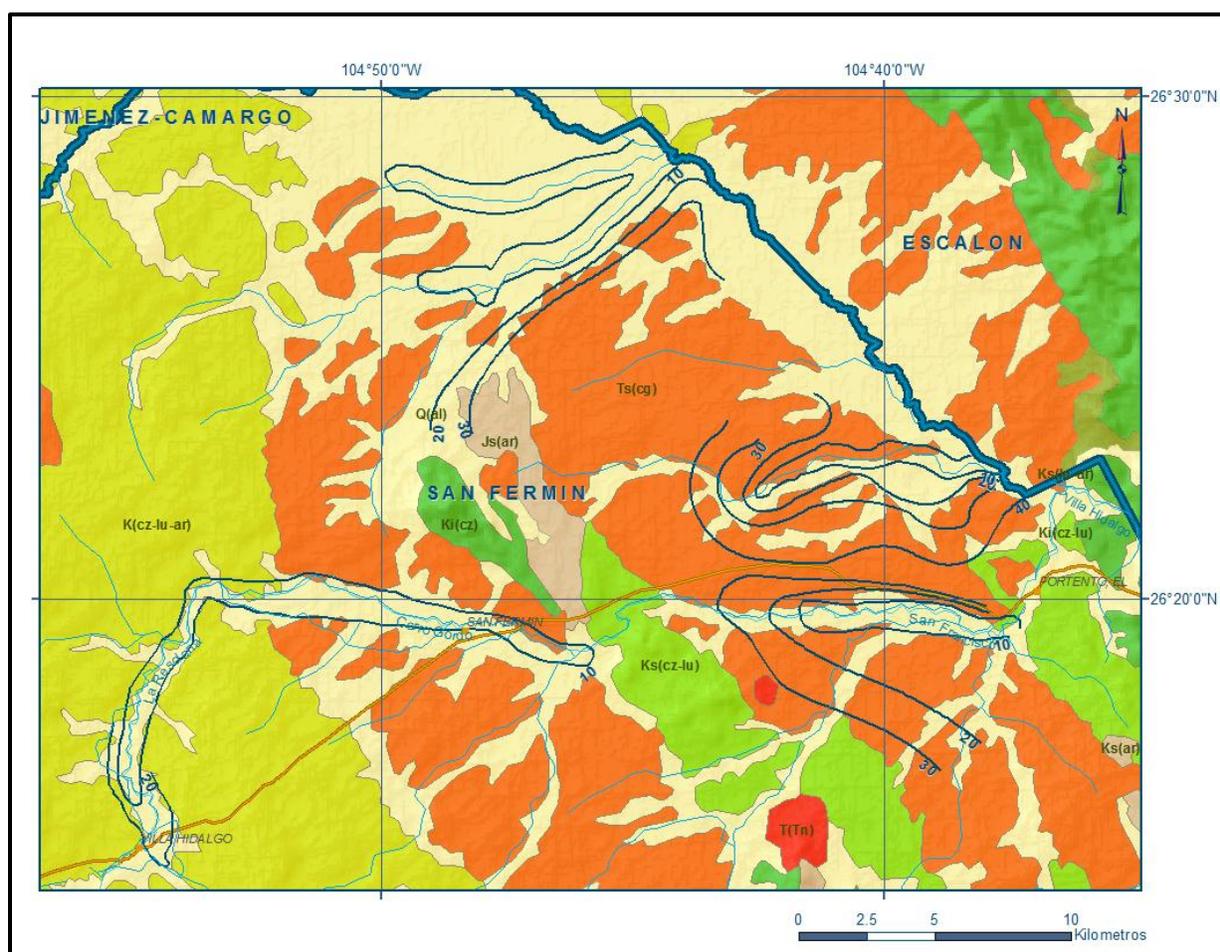


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían de 1700, en la parte del acuífero que es límite con el acuífero Revolución, inmediatamente aguas debajo de la presa Villa Hidalgo, hasta 1450 msnm que se presentan en el extremo oriental, descendiendo gradualmente a lo largo del cauce de los arroyos Cerro Gordo y San Francisco y desde los pie de monte.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 3 muestras de agua subterránea de 3 aprovechamientos (pozos) distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente (tabla 2). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Tabla 2. Datos de las muestras de agua.

APROVECHAMIENTOS	X	Y	LATITUD	LONGITUD	CE (µs/cm)	STD (ppm)	pH	T (°C)	ALK (ml de HCl)
CNA-1015-07	509720	2902862	26.24686	-104.90267	696	314	7.77	19.39	4.8
CNA-1015-04	519657	2911247	26.32247	-104.80305	804	362	7.94	21.01	4.8
CNA-1015-01	536793	2911536	26.32474	-104.63134	4017	1813	7.68	21.63	3.4

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 314 a 1813 ppm.

La muestra que presenta el último valor se sobrepasa del límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano. Su origen puede deberse a un problema local de contaminación.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C_2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración que ha circulado principalmente a través de rocas sedimentarias.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010 se registraron un total de 17 aprovechamientos, 16 son pozos y sólo una noria; todos ellos activos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **0.4 hm³ anuales**, de los cuales 0.3 hm³ (75%) se destinan al uso agrícola, 0.05 más (12.5 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y los 0.05 hm³ restantes (12.5 %) se utilizan para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 270 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de 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 como sigue:

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

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

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita sobre los depósitos aluviales y conglomerados que conforman los valles, así como la infiltración que se produce a lo largo de los escurrimientos superficiales (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, 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 la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida. Por lo que $R_i = 0$.

7.1.1. Recarga vertical

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) tiende a ser nulo, y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas por flujo horizontal subterráneo;

B = Bombeo;

S_h = Salidas por flujo horizontal subterráneo;

ETR = Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$ =Cambio en el volumen almacenado;

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

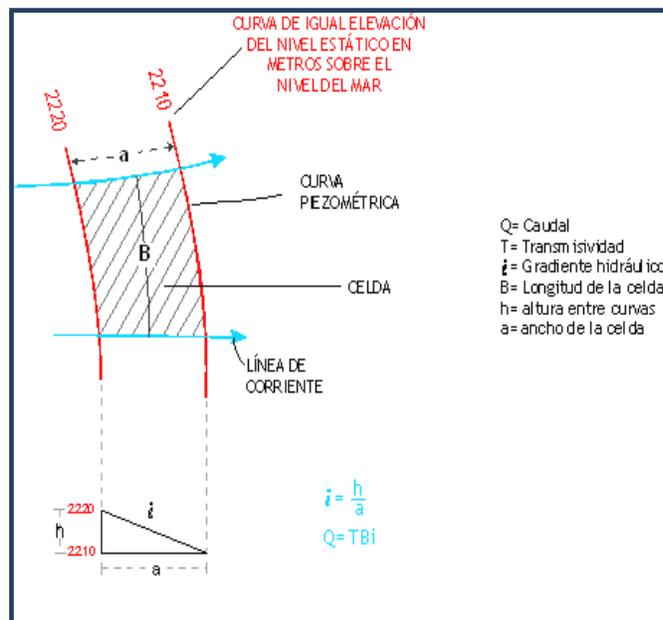
$$Q = B * i * T$$

Donde:

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

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	3120	1300	10	0.0077	0.0008	0.0192	0.6
E2	4415	1820	10	0.0055	0.0008	0.0194	0.6
E3	3640	1820	10	0.0055	0.0008	0.0160	0.5
E4	2340	2080	10	0.0048	0.0003	0.0034	0.1
E5	3115	780	10	0.0128	0.0003	0.0120	0.4
E6	3115	520	10	0.0192	0.0003	0.0180	0.6
E7	2600	780	30	0.0385	0.0003	0.0300	0.9
E8	2600	520	30	0.0577	0.0003	0.0450	1.4
E9	1300	1300	30	0.0231	0.0003	0.0090	0.3
E10	4415	1820	30	0.0165	0.0003	0.0218	0.7
E11	7270	1820	10	0.0055	0.0003	0.0120	0.4
E12	2600	2080	10	0.0048	0.0005	0.0063	0.2
Total entradas							6.7

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **6.7 $hm^3/año$** .

Debido a que en este acuífero no fue posible realizar pruebas de bombeo, los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo ejecutadas en los acuíferos vecinos: La Zarca-Revolución, Buenos Aires y Revolución, adaptadas al espesor saturado en cada zona y correlacionadas hidrogeológicamente debido a que el origen y la evolución geológica son comunes en esta región.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh), a través de evaporación directa en las zonas de niveles freáticos someros (Ev) y por Bombeo (B). No existen manantiales, ni flujo base en ríos, ya que ambos son de régimen intermitente.

7.2.1. Salidas por flujo subterráneo horizontal

Las salidas subterráneas se evalúan de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración del elevación del NE del año 2010, mostrada en la figura 5; sin embargo no existe apoyo piezométrico suficiente que evidencie su presencia. Por lo tanto **Sh = 0**.

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real).

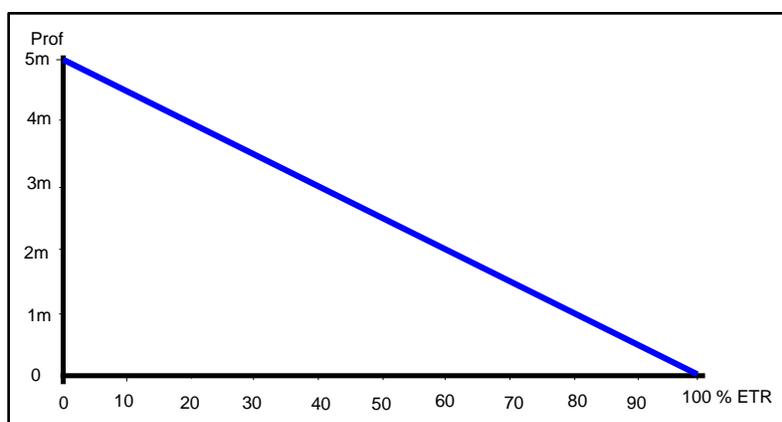
Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.8		
P(mm) =	361.6	P ² =	130754.56
L =	957.0816	L ² =	916005.189
ETR (mm)	354.1		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el 50 % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Tomando en cuenta una superficie de 40 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 2.5 m y la lámina de evapotranspiración obtenida de 354.1 mm (con valores de 361.6 mm anuales para la precipitación y 16.8 °C de temperatura). $ETR = 40 \text{ km}^2 (0.3541 \text{ m}) (0.5) = 7.1$. Por lo tanto **ETR = 7.1 hm³/año**.

7.2.3. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **0.4 hm³/año**.

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en

tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

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 infiltración vertical (Rv), el cual será calculado a partir de la ecuación (2):

$$\begin{aligned} Rv &= Sh + B + ETR - \Delta V(S) - Eh & (2) \\ Rv &= 0.0 + 0.4 + 7.1 - 0.0 - 6.7 \\ Rv &= 0.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (Rt) es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} Rt &= Rv + Eh \\ Rt &= 6.7 + 0.8 \\ Rt &= 7.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

Rt= Recarga total media anual;

DNCOM= Descarga natural comprometida;

VCAS= Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **7.5 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero San Fermín, la descarga por flujo subterráneo ocurre dentro del acuífero, por lo que no se considera descarga natural comprometida. Por lo que **DNCOM = 0**.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte **al 31 de marzo de 2010, es de 362,875m³/año**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$\begin{aligned} \mathbf{DAS} &= \mathbf{Rt} - \mathbf{DNCOM} - \mathbf{VCAS} & \mathbf{(3)} \\ \mathbf{DAS} &= 7.5 - 0.0 - 0.362875 \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{7.137125hm^3/año} \end{aligned}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **7'137,125 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010, Estudio para determinar la disponibilidad de los acuíferos Cabrera-Ocampo , Matalotes-El Oro, San José de Nazareno, Galeana-El Quemado, La Victoria, Buenos Aires, Torreón de Cañas, San Fermín, San Juan del Río, Cabrera, La Zarca-Revolución y Revolución, en el estado de Durango, Universidad de Sonora (UNISON).

Servicio Geológico Mexicano, 2002, Carta Geológica-Minera G13-B82 "Atotonilco", escala 1:50,000.