

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Revolución (1029),
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.**

CCCLXXXVIII 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

1029	REVOLUCIÓN	6.6	0.0	0.051501	0.1	6.548499	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 REVOLUCIÓN (1029), 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	4
3.1.	Provincia fisiográfica	4
3.2.	Clima	4
3.3.	Hidrografía	5
3.4.	Geomorfología	6
4.	GEOLOGÍA	6
4.1.	Estratigrafía	7
4.2.	Geología estructural	8
4.3.	Geología del subsuelo	9
5.	HIDROGEOLOGÍA	10
5.1.	Tipo de acuífero	10
5.2.	Parámetros hidráulicos	10
5.3.	Piezometría	11
5.4.	Comportamiento hidráulico	11
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	11
5.4.2.	Elevación del nivel estático	11
5.4.3.	Evolución del nivel estático	14
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 (Rv)	16
7.1.2.	Entradas subterráneas horizontales (Eh)	16
7.2.	Salidas	18
7.2.1.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	18
7.2.2.	Evapotranspiración (ETR)	18
7.2.3.	Bombeo (B)	19
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	19
8.	DISPONIBILIDAD	20
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	20
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	20
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	21
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	21
9.	BIBLIOGRAFÍA	21

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 Revolución, designado con la clave 1029 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción norte del estado de Durango, entre las coordenadas 25°54' " y 26°19' de latitud norte y 104°51' y 105°13' de longitud oeste, abarcando una superficie de 839 km².

Limita al norte con el acuífero Torreón de Cañas; al sur con Buenos Aires y la Zarca Revolución; al este con San Fermín y al oeste con los acuíferos Cabrera-Ocampo y Cabrera, todos ellos pertenecientes al estado de Durango (figura 1).

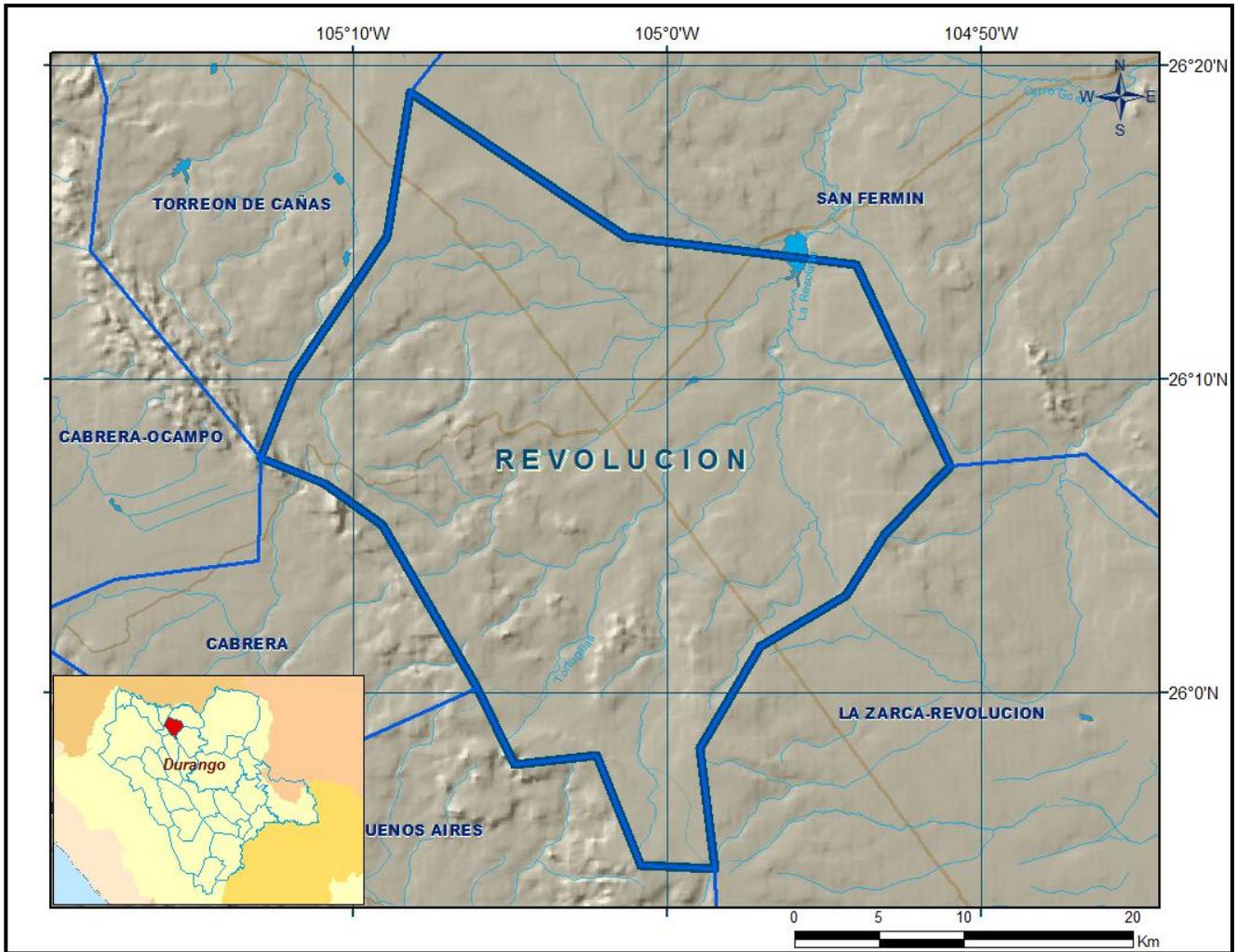


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero se localiza casi en su totalidad dentro del municipio de Hidalgo y una pequeña porción de su extremo suroccidental en el municipio de Indé.

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

Tabla 1. Coordenadas de la Poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1029 REVOLUCION						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	104	57	3.6	26	1	28.1
2	104	58	57.6	25	58	13.1
3	104	58	30.1	25	54	21.0
4	105	0	51.7	25	54	28.7
5	105	2	16.3	25	57	58.4
6	105	4	52.4	25	57	41.5
7	105	6	3.3	26	0	6.4
8	105	9	4.6	26	5	20.0
9	105	10	54.9	26	6	39.0
10	105	12	57.4	26	7	27.1
11	105	11	55.0	26	10	6.4
12	105	8	55.8	26	14	32.2
13	105	8	11.8	26	19	8.9
14	105	1	19.0	26	14	31.1
15	104	53	59.5	26	13	38.0
16	104	50	59.7	26	7	11.5
17	104	53	6.7	26	4	59.3
18	104	54	18.0	26	3	3.7
1	104	57	3.6	26	1	28.1

1.2. Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero pertenece a la región Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Durango. Su territorio completo no se encuentra sujeto a ninguna veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos vigente para el 2010, los municipios Hidalgo e Indé se clasifican como zona de disponibilidad 7. El principal usuario del agua subterránea es el Público Urbano. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS 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. Realizado 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.

Este estudio fue 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

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas del INEGI (1997), el área que comprende el acuífero se ubica dentro de dos provincias, la Sierras Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango, y Sierras y Llanuras del Norte, Subprovincia Bolsón de Mapimí. La mayor parte del acuífero se localiza en esta subprovincia.

La subprovincia de la Sierras y Llanuras de Durango se caracteriza por presentar valles, llanos y lomeríos limitados por sierras orientadas en dirección norte-sur. Sus sierras son de origen volcánico, alternadas con sierras constituidas por rocas sedimentarias que presentan diverso grado de plegamiento.

La subprovincia fisiográfica Bolsón del Mapimí se caracteriza por presentar un estado de erosión avanzado, con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, también llamados bolsones.

3.2. Clima

Con base en la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el acuífero Revolución se presentan un clima secos estepario (BS), principalmente del tipo BS₁kw(w) que es el menos seco de los climas secos

El tipo BS₁kw(w) es de subtipo semiseco (₁), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Por otro lado, en el clima BS₀kw(w), el subtipo (₀) indica que es seco, pues su grado de humedad es menor de 22.9. La condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas media anual del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido. Presentan una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la media mes más frío entre -3 y 18 °C y la del 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, es de verano. Esto significa que 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 su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es < 5.

En una pequeña porción al noreste del acuífero, se manifiesta el clima BS₀hw(w), cuya diferencia con respecto al clima anterior, es su subtipo seco (₀), de manera que el coeficiente del grado de humedad es menor de 22.9, y su condición de temperatura (h) corresponde con semicálido e invierno fresco.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de cuatro estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Santa María del Oro, Villa Hidalgo, Indé y El Mirador, cuyo registro comprende los periodos 1967-2007, 1961-2006, 1979-2007, 1979-2006, respectivamente. Con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura **286.1 mm y 15.9 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,621.4 mm anuales**

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH 35 denominada Mapimí, Cuenca del A. Cerro Gordo. 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 conformada por los ríos Las Tortuguillas y La Resolana que desembocan a la laguna Las Palomas. La hidrografía está compuesta por arroyos secos prácticamente todo el año, los cuales en algunas áreas se pierden debido a las fallas y fracturas de la sierra. Entre estos arroyos destacan El Rey, El Coyote, El Zorrillo y La Leche, los cuales forman las pequeñas lagunas efímeras del mismo nombre. Sólo la laguna Las Palomas es perenne.

3.4. Geomorfología

El relieve se caracteriza por fosas originadas por la erosión en la zona de los valles fluviales, presentes tanto en la planicie como en la sierra. También por pilares causados por esfuerzos de tensión en la sierra de Atotonilco.

Existe en el paisaje sierras plegadas que se encuentran enclavadas en una extensa planicie. Estas 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.

Por otro lado, en ninguno de los estudios geológicos consultados se reportan rocas pre-Mesozoicas, ni tampoco se menciona algún tipo basamento en la región (Córdoba, 1988), por lo que es posible establecer que las edades de las rocas o secuencias principales oscilan entre el Cretácico Temprano y el Holoceno.

En los extremos nororiental y oriental del acuífero afloran rocas sedimentarias de tipo arenocalcáreas, depositadas durante el Triásico. El Cretácico está representado por estructuras que forman las sierras que delimitan el extremo occidental, las cuales presentan una orientación NW-SE, controladas por anticlinales buzantes. En el extremo occidental, se emplazan rocas ígneas extrusivas de composición riolítica, andesitas y tobas riolíticas, que se emplazaron durante el periodo comprendido entre el Jurásico Superior y el Oligoceno (figura 2).

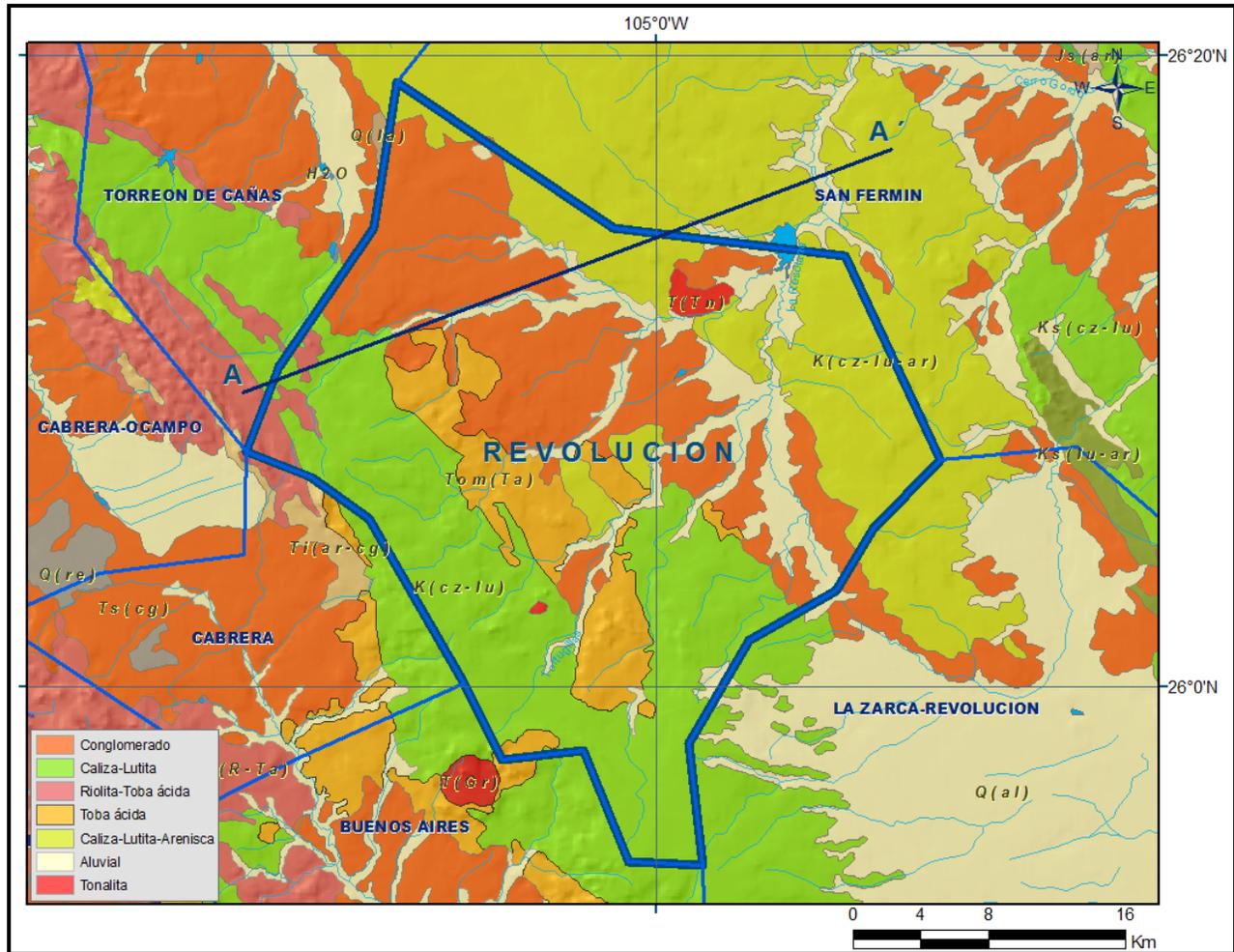


Figura 2. Geología general de acuífero

4.1. Estratigrafía

Cretácico superior

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, sur 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.

Formación Aurora

El nombre Formación Aurora fue propuesto por Burrows (1910) para aquellas rocas que afloran en la porción noreste del estado de Chihuahua, donde 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.

Paleógeno-Neógeno

Grupo Carpintero

Esta unidad fue definida por Swanson *et al.* (1978) en la localidad del arroyo del Carpintero, ubicado al NW de la ciudad de Durango, relacionándolo con la Formación de la Caldera de Chupaderos. Consiste de las Formaciones El Águila, Cacaria y Santuario, además de una serie de domos y estructuras tipo plugs latíticos, traquíticos y riolíticos, rocas volcánicas ácidas como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e Ignimbritas. La edad de esta unidad es del Oligoceno Medio, a partir de datación radiométrica por el método K-Ar de 28.3 a 31.4 Ma.

Conglomerado polimíctico Formación Santa Inés

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 una matriz arenosa con clastos de roca volcánica ácida subredondeados a subangulosos del tamaño de guijas finas a cantos medianos, que varía de no consolidado a bien cementado. 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. En los afloramientos se tiene un espesor de 20 a 200 m y en la región se encuentra cubriendo discordantemente a las formaciones Mezcalera, Baluarte, Grupo Registro, Grupo Carpintero, Grupo Río Chico y formación Metates; mientras que infrayace concordantemente a los basaltos Guadiana.

Cuaternario

Depósitos fluviales 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 formados 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 pegamiento 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.

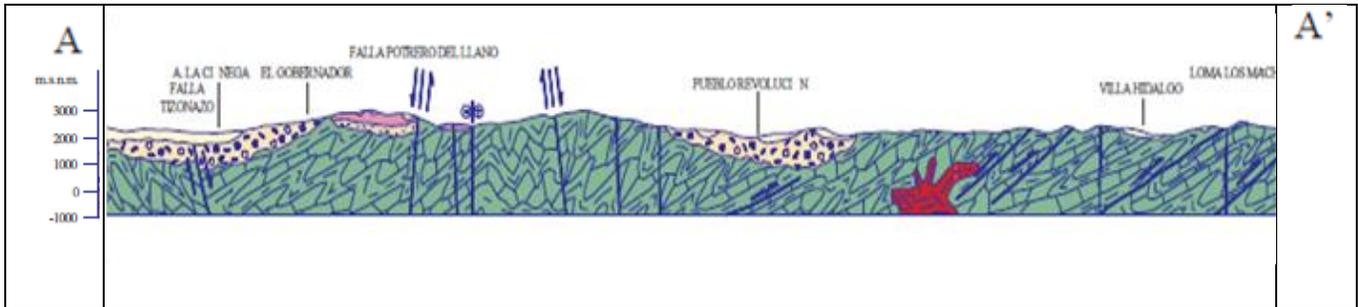
La geología estructural está influenciada por la presencia de pliegues simétricos y asimétricos, principalmente, así como fallas inversas de bajo ángulo (cabalgadura con orientación NW). Los pliegues se observan en las rocas sedimentarias en la sierra de Atotonilco. Las fallas normales, se presentan principalmente en las rocas volcánicas, dando lugar a discontinuidades, como la que se presentan al norte del acuífero, en la que los pliegues están rotos por la cabalgadura.

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 (figura 3). 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.



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-5 "Hidalgo del Parral". Esc. 1:250,000 (SGM, 2000)

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

Como parte del estudio realizado en el año 2010 se ejecutó una sola prueba de bombeo de corta duración en una noria, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que el valor de la transmisividad en la etapa de abatimiento es de $3.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y en la etapa de recuperación es de $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, por lo que el valor promedio es de $3.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, consistente con los obtenidos en acuíferos vecinos La Zarca-Revolución y Cabrera-Ocampo. En cuanto a la conductividad hidráulica, su valor promedio es de $3.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

La prueba de bombeo no contó con pozo de observación, por lo que no se pudo obtener el valor del coeficiente de almacenamiento

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

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 4, los valores varían desde algunos metros, a lo largo de cauce de los ríos Las Tortuguillas, La Resolana y arroyos tributarios, hasta los 10 m, aumentando gradualmente hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero conforme se asciende topográficamente. Las mayores profundidades se presentan en el extremo noroccidental del acuífero, las cuales alcanzan los 70 m.

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 1800 a 1920 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Los valores más bajos se localizan a lo largo del cauce de los ríos Las Tortuguillas y La Resolana, desde donde se incrementan por efecto de la topografía hacia los extremos norte y occidental.

De esta manera, es posible identificar direcciones preferenciales del flujo subterráneo de noroeste a sureste y oeste-este, con alimentaciones procedentes de los extremos norte y sur del acuífero, para finalmente confluir en la porción central del acuífero y continuar su curso paralelo a la dirección del escurrimiento superficial, en dirección de la presa Villa Hidalgo.

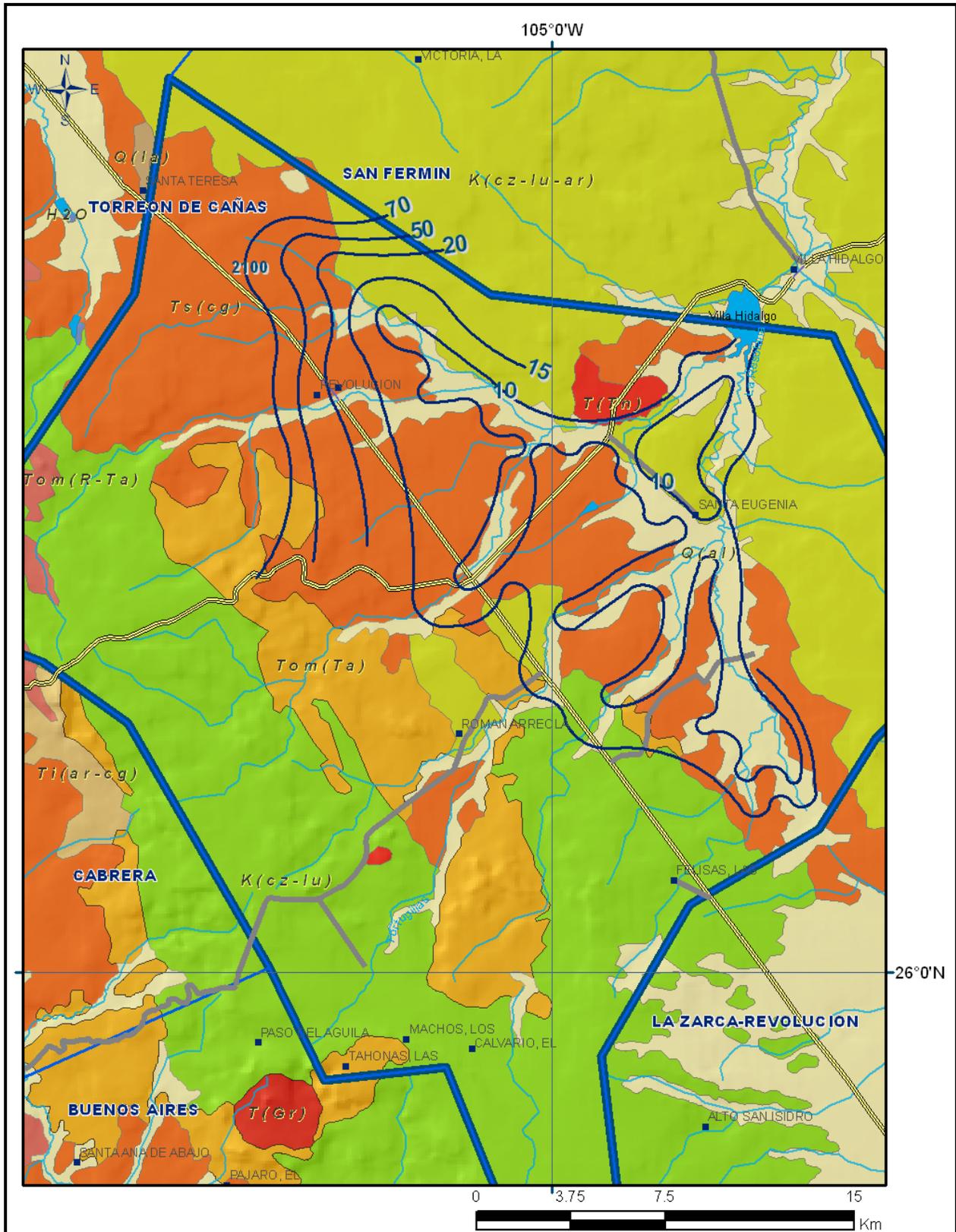


Figura 4. Profundidad al nivel estático en metros (2010)

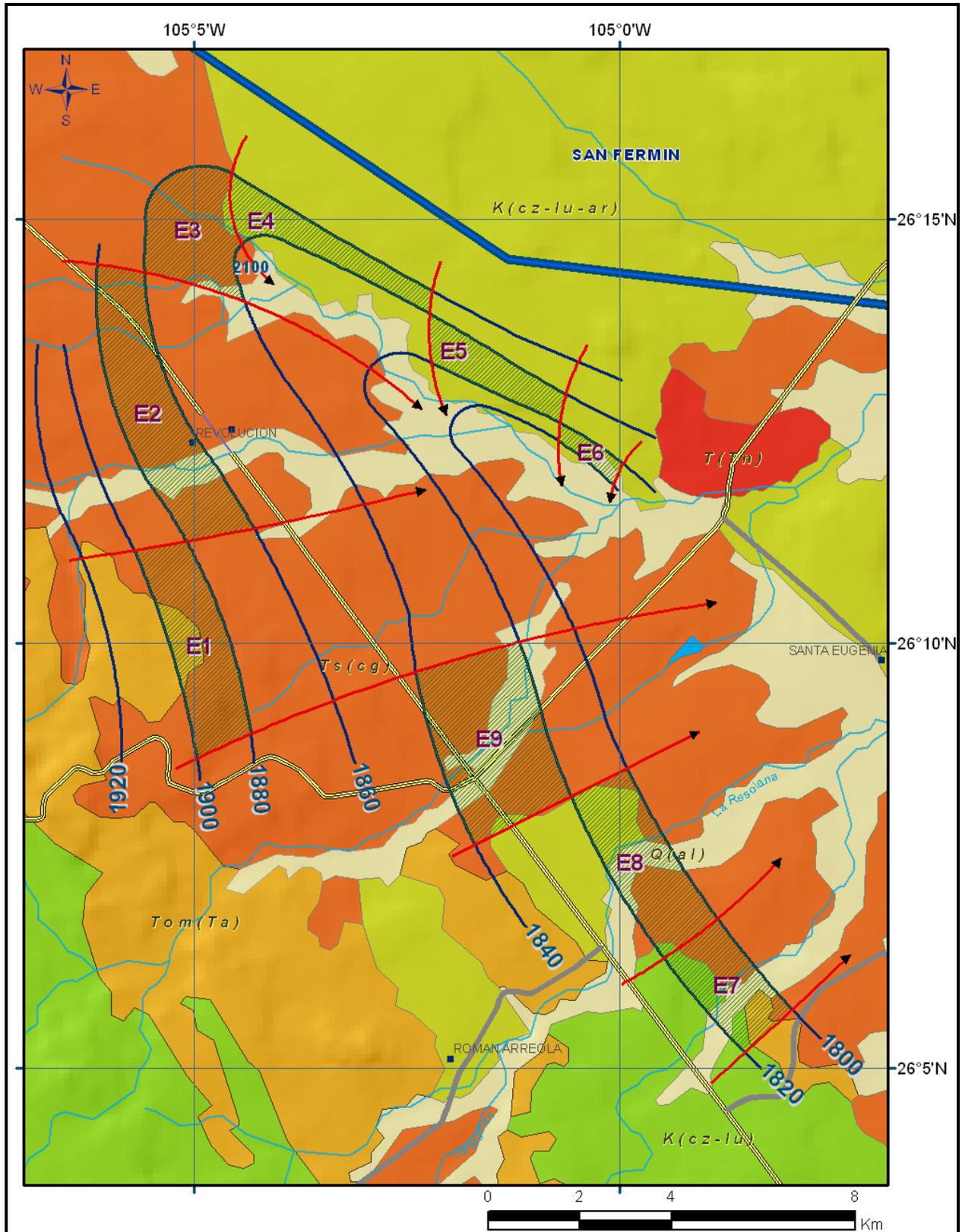


Figura 5. Elevación de nivel estático en msnm (2010)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. 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 en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (3 pozos), 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. Aprovechamientos muestreados en el acuífero Revolución

APROVECHAMIENTOS	Lat.	Long.	CE (µs/cm)	STD (ppm)	pH	T °C	ALK (ml de HCl)
CNA-1029-02	26.10769	-105.19591	547	246	7.63	25.71	4.6
CNA-1029-27	26.20190	-105.01411	660	240	8.26	25.36	4.3
CNA-1029-20	26.20234	-105.09954	355	161	8.3	26.13	3.7

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 161 a 246 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano.

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 principalmente 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 registró a existencia de 35 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 34 son pozos y sólo una noria; todos ellos activos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **0.1 hm³ anuales**, de los cuales 0.05 hm³ (50 %) se destinan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y los 0.05 hm³ restantes (50% %) se utilizan para satisfacer las necesidades del uso Doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 150 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 de un 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 (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuentes 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 y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1. Recarga Vertical (R_v)

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:

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

Dónde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas subterráneas por flujo horizontal;

B = Bombeo;

Sh = Salidas subterráneas por flujo horizontal;

ETR = Evapotranspiración real;

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

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

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

7.1.2. Entradas subterráneas horizontales (E_h)

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

Para su cálculo 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

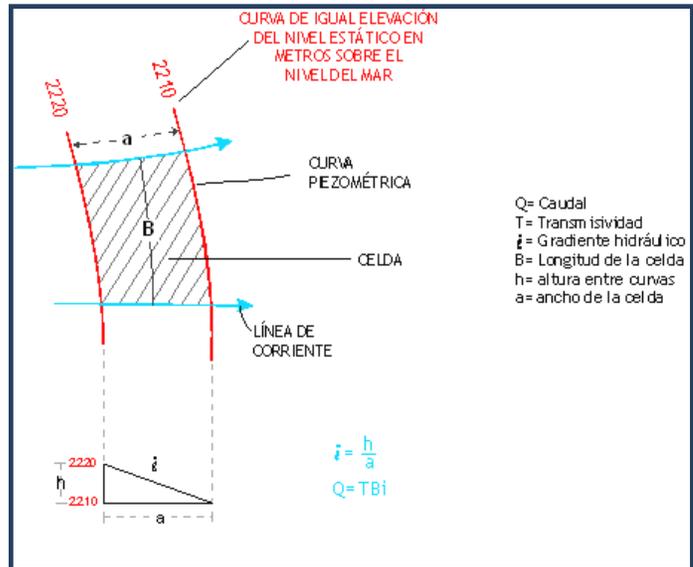
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T= Transmisividad ($m^2/día$);



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **4.7 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

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	4500	1290	20	0.0155	0.0003	0.0209	0.7
E2	6860	1500	20	0.0133	0.0003	0.0274	0.9
E3	1500	1715	20	0.0117	0.0003	0.0052	0.2
E4	4930	430	20	0.0465	0.0002	0.0459	1.4
E5	3215	640	20	0.0313	0.0001	0.0100	0.3
E6	1715	430	20	0.0465	0.0001	0.0080	0.3
E7	3215	1715	20	0.0117	0.0003	0.0112	0.4
E8	3860	1820	20	0.0110	0.0002	0.0085	0.3
E9	3430	2140	20	0.0093	0.0004	0.0128	0.4
Total entradas							4.7

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, obtenidas tanto en este acuífero como en los acuíferos vecinos La Zarca-Revolución y Buenos Aires, adaptadas al espesor saturado en cada zona y correlacionadas hidrogeológicamente debido a que tanto el origen como la evolución geológica son comunes en esta región del país.

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 (Sh)

Las salidas subterráneas se evalúan de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la 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, sin embargo, la limitación teórica de esta fórmula es que para $P < 0.31$, L daría una ETR mayor que la precipitación, por lo tanto, en estos casos habrá que considerar a $ETR = P$.

En su lugar, se utilizó la fórmula de Coutagne quien propone la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

$$ETR = P - \lambda P^2, \text{ con } \lambda = 1.00 / (0.80 + 0.14 T)$$

La fórmula solo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre $1/8X$ y $1/2X$, estando ETR y P en metros, y T en °C.

Si P es menor que $1/8X$ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que $1/2X$ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por la ecuación siguiente $ETR = 0.20 + 0.035 T$.

COUTAGNE	$ETR = P - \chi P^2$
Donde:	
ETR= Evapotranspiración m/año	
P = precipitación en m/año	0.2861
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$	
t = temperatura en °C	15.9
ETR (m)	0.2591

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. Tomando en cuenta una superficie de 25 km², en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 2.5 m, y la lámina de evapotranspiración obtenida de 259.1 mm: $ETR = 25 \text{ km}^2 (0.2591 \text{ m}) = 6.5$.

Por lo tanto; **ETR = 6.5 hm³/año.**

7.2.3. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de los **0.1 hm³ anuales.**

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

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 calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

$$RV = Sh + B + ETR - \Delta V(S) - Eh \quad (2)$$

$$Rv = 0.0 + 0.1 + 6.5 - 0.0 - 4.7$$

$$Rv = 1.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$Rt = Rv + Eh$$

$$Rt = 4.7 + 1.9$$

$$Rt = 6.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 de manera natural como inducida. Para este caso particular, su valor es de **6.6 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 Revolución se considera que no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto la **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 53,782 m³**.

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.

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

$$DAS = 6.6 - 0.0 - 0.053782$$

$$\mathbf{DAS = 6.546218 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

El resultado indica que existe actualmente un volumen de **6'546,218 m³ anuales** disponibles 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, Galena-El Quemado, La Victoria, Buenos Aires, Torreón de Cañas, San Fermín, San Juan del Río, Cabrera, La Zarca-Revolución y Revolución, estado de Durango. Realizado por convenio con la Universidad de Sonora

Consejo de Recursos Minerales, Departamento de Sensores Remotos, 1994. Informe Geomorfológico Preliminar del proyecto Atotonilco, Villa Hidalgo, Dgo.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera G13-5 "Hidalgo del Parral", escala 1:250,000