



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO REGIÓN MANZANERA - ZAPALINAMÉ
(0511), ESTADO DE COAHUILA**

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.....	7
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología Estructural.....	13
4.3 Geología del subsuelo	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1 Tipo de acuífero	15
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría	18
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3 Evolución del nivel estático	21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	25
7.1 Entradas	25
7.1.1 Recarga natural.....	25
7.1.2 Infiltración de la lluvia	25
7.1.3. Recarga inducida.....	28
7.1.4 Infiltración por excedentes de riego.....	28
7.1.5. Flujo horizontal.....	29
7.2 Salidas.....	29
7.2.1 Descarga natural por manantiales	29
7.2.2 Extracción por bombeo (B).....	29
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	30
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	30
8. DISPONIBILIDAD	30
8.1 Recarga total media anual (R).....	31
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	31
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	31
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	32
9. BIBLIOGRAFÍA	33

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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

1.1 Localización

El acuífero Región Manzanera-Zapalinamé, definido con la clave 0511 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la parte sureste del estado de Coahuila al oriente de la Ciudad de Saltillo, cuenta con una superficie aproximada de 1,463 km² que cubre una serie de valles y sierras, estrechos paralelos entre sí. (Figura 1). Al noreste limita con el Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, al poniente con el Acuífero Cañón de Derramadero y al oriente con el estado de Nuevo León.

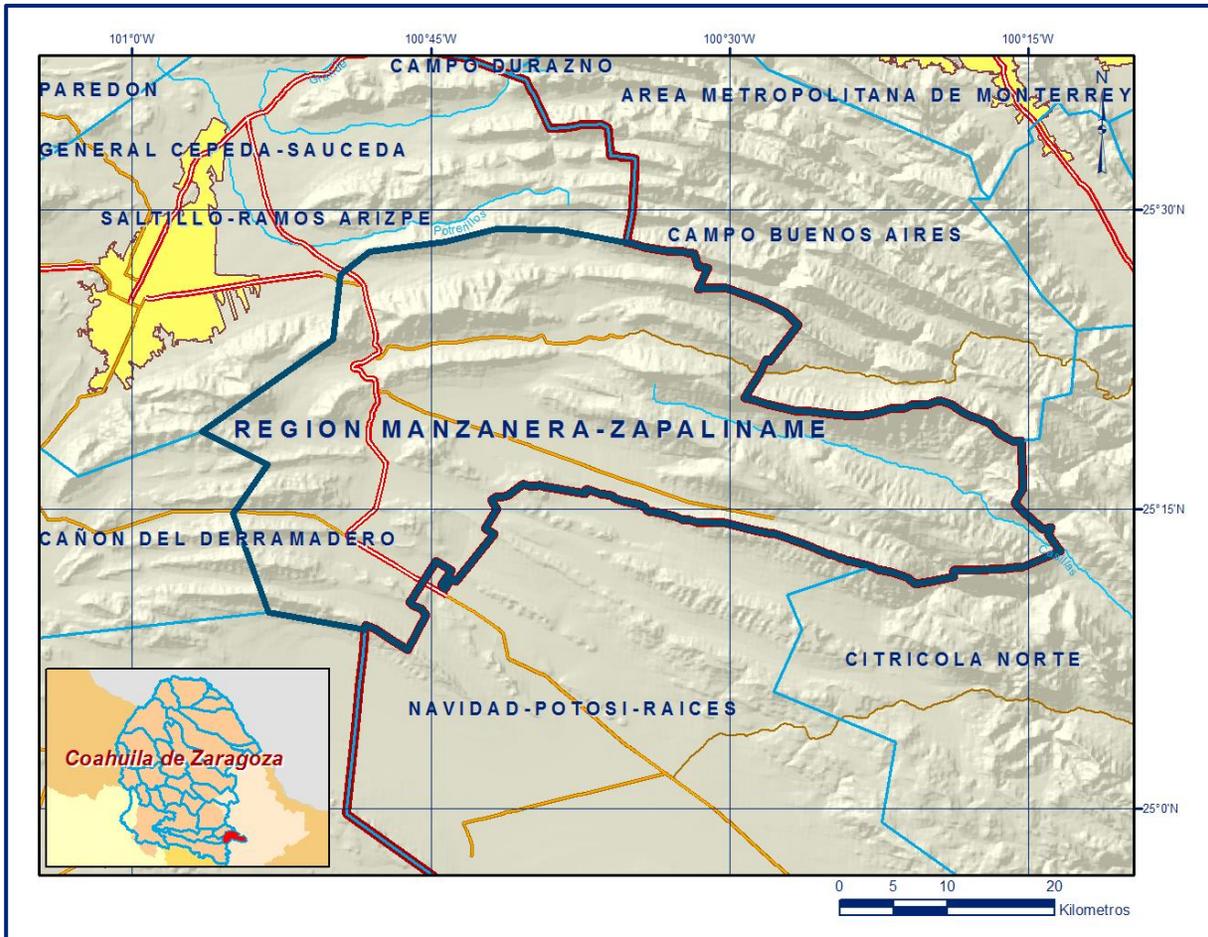


Figura 1. Localización del acuífero

Las poblaciones más importantes dentro del área que ocupa el acuífero son: Arteaga, San Antonio de las Alazanas, Huachichil, Los Lirios, Jamé y El Tunal. La población urbana de Arteaga es de aproximadamente 7,544 habitantes.

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

ACUIFERO 0511 REGION MANZANERA-ZAPALINAME							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	15	21.0	25	18	23.5	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	100	22	50.8	25	12	6.7	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	100	48	18.8	25	8	58.0	
4	100	53	10.0	25	9	48.5	
5	100	54	57.4	25	14	45.9	
6	100	53	12.6	25	17	13.8	
7	100	56	29.9	25	18	51.8	
8	100	49	55.6	25	23	29.3	
9	100	49	32.6	25	26	42.1	
10	100	48	5.4	25	27	53.0	
11	100	44	16.6	25	28	22.8	
12	100	41	40.4	25	29	0.9	
13	100	38	41.7	25	28	57.3	
14	100	35	11.1	25	28	18.5	DEL 14 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	100	15	21.0	25	18	23.5	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El Acuífero en su gran parte se encuentra en zona de libre alumbramiento de conformidad con el párrafo V del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

En su porción poniente comprende parte de la zona de veda publicada en el Diario Oficial de la Federación el jueves 7 de abril de 1979. Esta veda es de tipo rígido y su decreto correspondiente dice textualmente *“Decreto por el que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas subterráneas, de la zona no vedada por el diverso publicado el 7 de febrero de 1952, en el área que ocupa el Municipio de Saltillo, Coah., y se decreta de interés público la conservación de los mantos acuíferos de dicha zona”*.

De acuerdo con información proporcionada por SAGAR del Estado de Coahuila, en la zona existen registradas 37 unidades de riego pertenecientes al Distrito de Riego 4 Saltillo. Estas unidades contabilizan 64 aprovechamientos de agua subterránea (58 pozos y 6 manantiales) y 744 has cultivadas.

El Registro Público de Derechos de Agua de esta Gerencia Estatal, reporta 6 de estas unidades de riego con aprovechamientos regularizados con un volumen total concesionado de 2.735 hm³/año.

De acuerdo con la información proporcionada por el REPDA de esta Gerencia Estatal en Coahuila, los usuarios mayores de agua subterránea del Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé son: La Unidad de Riego de Usuarios de San Antonio de las Alazanas, Sociedad Frutícola Predio Las Flores, Ma. del Carmen López Sada, Ma. Eugenia López Villareal, Vikingo 90 SPR de RL, Unidad de Riego Victor M. Valdés V., Julián J. Dávila López, Javier L. Cabello Siller, Ignacio A. González Cepeda, El Bayonero, URDERAL El Tunal, Fernando Cepeda Flores, Pedro Vega Ramos, Angélica Padilla Dávila, Unidad de Riego San Juan de los Dolores y Arturo Mendel. Cada uno de estos usuarios tienen titulado un volumen mayor que 500,000 m³/año y en total concentran un 30% del volumen total concesionado de un universo de 604 usuarios con aprovechamientos regularizados

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

La empresa Estudios Geológicos y Obras Civiles (1974), realizó un estudio geohidrológico durante el cual fueron censados 184 aprovechamientos, 169 pozos y 15 norias. Se definieron dos tipos de acuíferos, en rocas calizas que constituyen las estructuras geológicas que forman el cuerpo de las sierras y el subsuelo, y en depósitos aluviales que rellenan los valles. En la confluencia de los valles El Tunal y Los Lirios, se identificó un cono de abatimiento debido a la extracción intensiva que se estimaba en 5.82 hm³/año. En el cañón Los Lirios se estimó una recarga lateral del orden de 0.11 hm³/año. En el Valle de Jamé la salida subterránea fue mínima (0.03 hm³/año) indicando la explotación total de su recarga. En el valle de San Antonio de las Alazanas la entrada subterránea fue similar a la salida (1.26 hm³/año y 1.5 hm³/año respectivamente), demostrando que la explotación era muy reducida.

La compañía Geoexploraciones y Construcciones S. A. (1983) realizó un estudio de prospección geohidrológica regional con el propósito de localizar fuentes de abastecimiento de agua a la Ciudad de Saltillo. Al sur en la zona de Cerro de En medio, Emiliano Zapata y Los Llanos se recomendaron perforaciones a 500 m hasta la cima de la Formación Taraises. En la Sierra de Arteaga en donde termina la estructura, se recomendó perforar, debido a que se encuentra aflorando la Formación Aurora. Se recomendó perforar un pozo exploratorio a 700 m de profundidad en la Sierra Zapalinamé con el objetivo de la Formación Cupido.

Otras zonas de interés fueron el Valle San José de los Nuncios para interceptar la salida de flujo subterráneo y la zona de falla en la región Jagüey de Ferniza.

En el estudio de geología estructural y de evaluación geohidrológica que realizó la empresa GEOIDE (1995) cubriendo casi en su totalidad la parte de la Sierra Madre Oriental conocida como “Curvatura de Monterrey”, se estimó una recarga natural de los acuíferos en rocas calizas del orden de $51 \text{ hm}^3/\text{año}$ deducida del método de Knisel.

Como posibles fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo, se recomendó la perforación exploratoria en la porción sur y sureste del Valle de Saltillo, así mismo se recomendó la exploración geofísica y la perforación exploratoria en el flanco sur de la estructura de Loma Larga.

La Comisión Nacional del Agua (1997), llevó a cabo trabajos de actualización geohidrológica en la zona, que permitieron determinar los parámetros hidráulicos de los acuíferos, el régimen de flujo, los volúmenes de extracción y la calidad del agua subterránea.

Los resultados más importantes son una extracción de $70 \text{ Mm}^3/\text{año}$ por medio de 657 aprovechamientos, de los cuales 651 son pozos, 5 norias y 1 galería filtrante. El Valle de Emiliano Zapata, específicamente en el Rancho Cerro En medio, y el Valle Huachichil, fueron establecidas como posibles fuentes adicionales de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo, por las características geológicas favorables que presentan los acuíferos calizos.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

El Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé se ubica en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, formando parte de la provincia estructural conocida como “Curvatura de Monterrey”.

La Sierra Madre Oriental en esta parte en donde existe un paquete de rocas sedimentarias marinas plegadas de edad entre el Jurásico Superior y Cretácico Inferior, se caracteriza por estructuras de pliegues anticlinales y sinclinales, con orientación regional Este-Oeste.

3.2 Clima

Las características del clima fueron analizadas con base en la información climatológica reportada por esta Gerencia Estatal para las siguientes estaciones: El Tunal, Jamé, Ciénega La Purísima, Potrero de Abrego, San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Huachichil, Observatorio de Saltillo, Carneros y Ramos Arizpe. La localización de estas estaciones climatológicas se muestra en plano anexo y en las tablas anexas correspondientes se condensan los datos mensuales y anuales de la temperatura, precipitación y evapotranspiración.

De acuerdo con la clasificación de climas según sistema de Köppen, modificado por E. García, en la región impera el clima semidesértico con lluvia en verano. La temperatura promedio anual varía entre -15° C y 32° C, con un promedio anual de 15.1° C. La precipitación promedio anual varía entre los 400 mm y 700 mm, las precipitaciones más altas se presentan hacia las sierras al oriente de las poblaciones El Tunal, Los Lirios, Jamé y San Antonio de las Alazanas, así como en las sierras al suroeste del Huachichil. Las más bajas se presentan hacia el Cañón La Carbonera y Valle Saltillo-Ramos Arizpe.. Los hidrogramas de la precipitación que se presentan en el anexo, revelan varios periodos lluviosos alternando con épocas de sequías, entendiendo como años lluviosos o secos cuando la precipitación es mayor o menor que la precipitación promedio anual respectivamente. De esta manera, se identifican los siguientes periodos lluviosos: 1971 a 1973, 1975 a 1976, 1981 a 1983, 1985 a 1988, 1990 a 1992, 1994 a 1995. Los periodos de sequía son: 1969 a 1970, 1974, 1977, 1979, 1984, 1989, 1993, 1996 a 1997.

3.3 Hidrografía

Región hidrológica, cuenca y subcuenca

El Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé, de acuerdo a la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250,000 Hoja Monterrey G14-7 editada por el INEGI (1981), se encuentra en la Región Hidrológica del Río Bravo (RH-24) y El Salado (RH-37). Dentro de la Cuenca del Río San Juan (B) y Cuenca Sierra Madre Oriental (A), cubriendo parte de la Subcuenca Río San Miguel (e8918) y Subcuenca San Rafael (1979).

Los escurrimientos superficiales son intermitentes caracterizados por descargas torrenciales en época de lluvias. Los arroyos que se encuentran en las zonas de valles y cañones, se consideran vías de recarga al acuífero por estar labrados sobre los depósitos aluviales permeables que los rellenan.

En este sentido, comúnmente los arroyos que descienden de las sierras desaparecen en las márgenes de los valles, como se puede observar en los valles San Antonio de las Alazanas, Emiliano Zapata y Huachichil. Los cauces principales generalmente están orientados Este-Oeste siguiendo la orientación de los valles. El Arroyo La Carbonera y el Arroyo La Roja confluyen con el Arroyo La Boca en la parte suroriente del Valle Saltillo-Ramos Arizpe. El Arroyo Los Lirios cambia de nombre a Arroyo Los Chorros al cruzar de sur a norte la Sierra La Nieve, para posteriormente ser conocido como Arroyo Blanco, también en la porción sureste del Valle Saltillo-Ramos Arizpe. El Arroyo La Boca y el Arroyo Blanco, ambos son afluentes del Arroyo El Pueblo. Los valles San Antonio de las Alazanas-Jamé, Emiliano Zapata y Huachichil, son subcuencas hidrológicas cerradas.

Infraestructura hidráulica

Por las características propias de los escurrimientos superficiales, en la zona que ocupa el acuífero no se tiene infraestructura hidráulica construida para el almacenamiento y aprovechamiento de las aguas superficiales tienen capacidades menores de 0.5 hm³.

3.4 Geomorfología

Los pliegues anticlinales de la zona generalmente conforman las sierras conformadas de calizas de formaciones del Cretácico Inferior que son resistentes a la erosión.

Los valles se forman en sinclinales debido a la presencia de lutitas y limolitas de formaciones del Cretácico Superior, que son poco resistentes al intemperismo. Excepto los valles que están labrados en los núcleos de anticlinales exponiendo las lutitas y areniscas de la Formación La Casita, como sucede en los valles El Tunal, Jamé y el Carmen.

4. GEOLOGÍA

El área del acuífero esta constituida principalmente por calizas de formaciones del Cretácico Inferior, conglomerados, lutitas, areniscas y depósitos aluviales que se encuentran rellenando los valles en zonas de sinclinales y anticlinales erosionados en su núcleo. Los depósitos aluviales del Cuaternario están constituidos principalmente de gravas de guijarros y bloques de calizas en una matriz arcillo-arenosa poco consolidada; también contienen arcillas y limos. Los depósitos aluviales del Cenozoico están compuestos por conglomerados calizos con matriz limo-arenosa. Estos dos tipos de sedimentos aluviales cubren discordantemente a las rocas sedimentarias marinas fracturadas subyacentes. Figura 2.

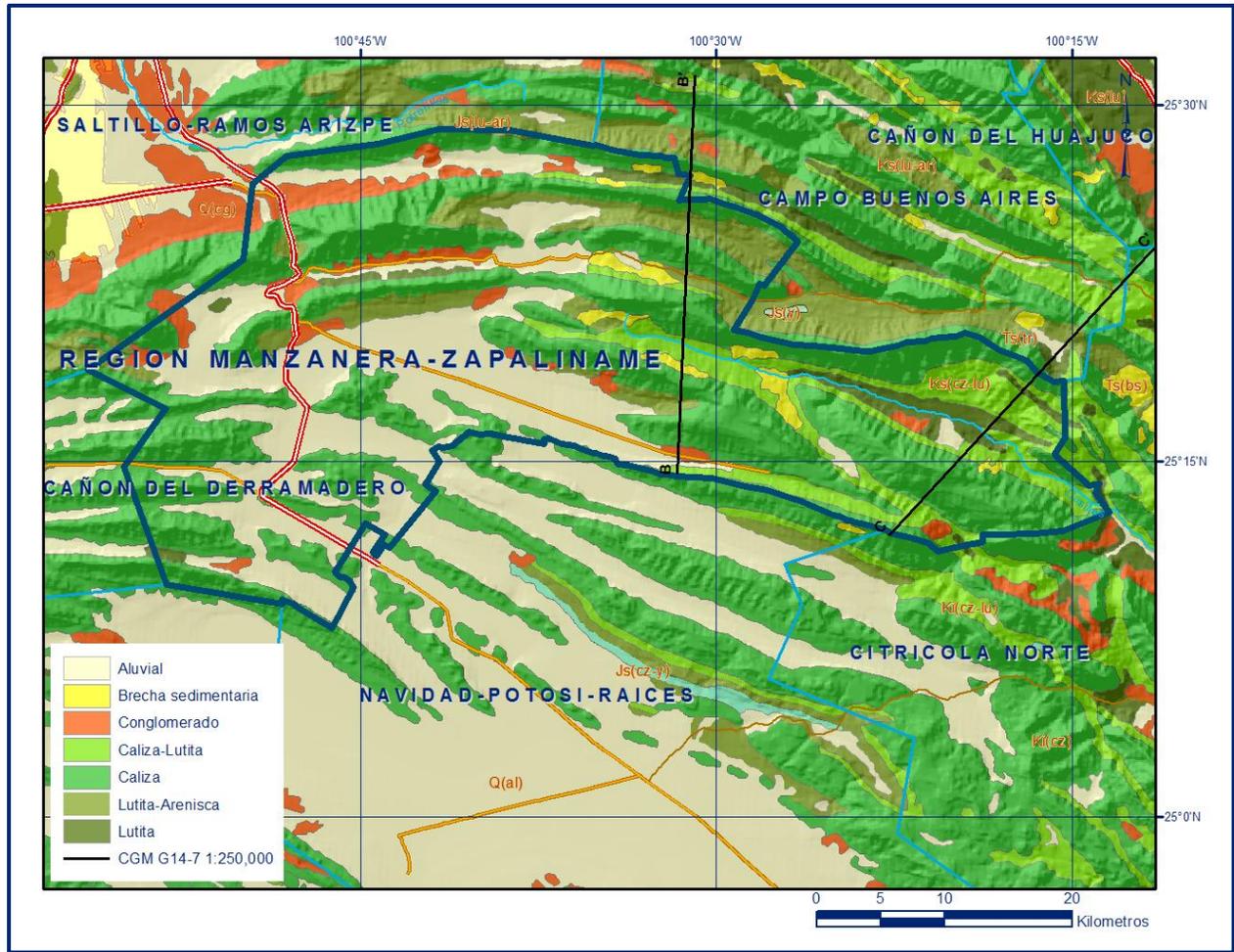


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La relación estratigráfica del acuífero se describe desde la más antigua a la más reciente:

Sistema Jurásico

Formación Zuloaga

Imlay (1938) propone formalmente el nombre de Formación Zuloaga de edad Oxfordiano probablemente Kimmeridgiano al Tithoniano, para denominar a 548 m de caliza gris oscuro de estratificación media a gruesa con nódulos de pedernal hacia la cima de esta unidad, la cual aflora fuera de la zona estudiada en el núcleo de los anticlinales Zapalinamé y Cuauhtémoc. Está constituida por caliza wackestone-packestone y grainstone que contienen oolitas, peletoides y nerineas, dispuestas en estratos medianos a gruesos de color gris oscuro que intemperiza a gris claro.

En la porción nororiental de la zona entre los anticlinales El Chorro al norte y Potrero de Ábrego al sur, aflora en forma de ventana tectónica un gran paquete de yesos. Hacia su cima se encuentran calizas en estratos gruesos de textura packstone con oolitas, peletoides y ostrácodos.

Formación La Casita

La Formación La Casita representa sedimentos del litoral de edad Kimmeridigiano-Portlandiano (Imlay, 1943). Aflora ampliamente en los núcleos de los siguientes anticlinales: Los Chorros, Jamé y San Antonio de la Alazanas. Consiste de lutitas y areniscas calcáreas en estratos medianos y delgados con horizontes de evaporitas (yesos). Descansa franca y concordantemente sobre la Formación Zuloaga y está cubierta también concordantemente por la Formación Taraises.

Sistema Cretácico Inferior

Formación Taraises

Fue definida por Imlay (1936) en el Cañón Taraises situado en la porción occidental de la Sierra de Parras en el estado de Coahuila. Se encuentra ampliamente distribuida dentro de la zona de estudio formando parte de los flancos de los siguientes anticlinales: Arteaga-San Juan Bautista, El Chorro y San Antonio de las Alazanas.

Está compuesta esencialmente por calizas arcillosas mudstone-wackestone color gris oscuro que intemperiza a gris claro, en estratos medianos a gruesos con intercalaciones de lutitas calcáreas verdosas; comúnmente se encuentran fisuradas con fracturas rellenas de calcita.

La Formación Taraises subyace concordantemente a la Formación Cupido y por su contenido microfaunístico, se le asigna una edad que va del Berriasiano al Valanginiano, pudiendo abarcar la parte basal del Hauteriviano (GEOIDE, 1993).

Formación Cupido

Imlay (1937) define como Caliza Cupido de edad Hauteriviano Superior-Barreniano, a una secuencia calcárea situada entre las formaciones Tamaulipas y La Peña. En el área de estudio presenta biofacies y litofacies de plataforma interna (laguna).

Está constituida por estratos gruesos de calizas color gris y crema que intemperiza a gris claro con texturas packstone de bioclastos, wackestone de miliólidos y wackestone-packstone de miliólidos y lamelibranqueos.

En ocasiones están recristalizadas y se le observan estratos de dolomías. También presentan estilolitas paralelas a la estratificación y fracturas selladas por calcita.

Formación La Peña

Definida por Imlay (1936) en la Sierra de Parras al sureste del estado de Coahuila con una edad del Aptiano Tardío. Se encuentra aflorando en gran parte de la zona estudiada, específicamente en los flancos de los siguientes anticlinales: Arteaga-San Juan Bautista, El Chorro, Jamé, Potrero de Ábrego, San Antonio de las Alazanas, Huachichil, Chapultepec y Cuauhtémoc. Está constituida por calizas arcillosas de color gris que intemperiza a gris claro en estratos delgados que se interestratifican con lutitas calcáreas color rosa a pardo gris en estratos delgados y con lentes de pedernal negro. En la parte superior de esta unidad se presentan abundantes amonitas.

Formación Aurora

La Caliza Aurora definida por Burrows (1935) no aflora en la zona geohidrológica evaluada, sino exclusivamente en el anticlinal de Loma Larga, situado al sureste de la Ciudad de Saltillo.

Está constituida por calizas mudstone, wackstone y packstone, en estratos de espesor variado, son de color gris oscuro que intemperiza a gris claro. La parte superior está formada por estratos delgados de calizas con bandas de pedernal y textura mudstone a wackstone.

Sobreyace concordantemente a la Formación La Peña y está cubierta de igual manera concordantemente por la Formación Indidura. Con base en el contenido microfaunístico identificado por GEOIDE (1993), le asignaron una edad Albiano-Cenomaniano.

Formación Tamaulipas Superior

Fue citada por primera vez por Stephenson (1921) cuando describe a la Caliza Tamaulipas de edad Albiano-Cenomaniano correlacionable en tiempo con la Caliza Aurora de la Plataforma y Península de Coahuila. Aflora en gran parte de la zona estudiada formando los flancos de varios anticlinales. Consiste de caliza wackstone color gris oscuro con microfósiles planctónicos en estratos medianos a gruesos con nódulos y lentes de pedernal. Los estratos son delgados a medianos y el pedernal es más abundante en su parte superior.

Cretácico Superior

Formación Agua Nueva

La Formación Agua Nueva de edad Turoniano establecida por Stephenson (1921) y correlacionable en tiempo con la Formación Indidura, aflora en numerosos sinclinales situados entre anticlinales. En general está constituida por calizas arcillosas laminares deleznales color negro a pardo en estratos delgados con intercalaciones de lutitas calcáreas laminares color negro. En algunas partes se le observa boudinage y fracturas selladas por calcita perpendiculares a la estratificación.

Formación San Felipe

La Formación San Felipe de edad Conaciano-Santoniano (Jeffreys, 1910), también aflora en zona de sinclinales sobreyaciendo transicionalmente y concordantemente a la Formación Agua Nueva. Consiste de una alternancia de calizas arcillo-arenosas mudstone y wackstone en estratos delgados a medianos que se intercalan con lutitas deleznales y con algunos horizontes de tobas bentoníticas.

Formación Parras

La Lutita Parras de edad Campaniano definida por Imlay (1936) al oriente de Parras de la Fuente, Coahuila, aflora ampliamente ocupando la parte axial de los sinclinales de la parte nororiental y suroccidental de la región estudiada.

Consiste de una secuencia homogénea y monótona de lutitas calcáreas y margas color gris oscuro que intemperiza a verde olivo. En ocasiones presenta horizontes delgados de caliza arcillosa y muestra fractura nodular, disgregándose fácilmente en forma espicular. La Lutita Parras sobreyace en forma transicional y concordante a la Formación San Felipe y subyace de la misma manera al Grupo Difunta.

Grupo Difunta

El Grupo Difunta nominado por Murray et. al. (1962) con una edad Campaniano Superior-Paleoceno Inferior, ocupa gran parte de la porción norte, occidental y noroccidental de la zona geohidrológica "Región Manzanera". Las formaciones que forman parte del Grupo Difunta en orden cronológico son: Cerro del Pueblo, Cerro Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo. Está constituido por una secuencia de areniscas de grano fino de colores que varían del café pardo a café grisáceo, alternando con lutitas arenosas calcáreas del mismo color. Se presentan en estratos delgados bien definidos y fracturados.

El Grupo Difunta sobreyace en forma concordante a la Lutita Parras y está cubierto parcialmente por depósitos aluviales.

Cenozoico-Cuaternario

Depósitos Aluviales

Se encuentran rellenando los valles en zonas de sinclinales y anticlinales erosionados en su núcleo. Los depósitos aluviales del Cuaternario, están constituidos principalmente de gravas de guijarros y bloques de calizas en una matriz arcillo-arenosa poco consolidada; también contienen arcillas y limos.

Los depósitos aluviales del Cenozoico, están compuestos por conglomerados calizos con matriz limo-arenosa. Estos dos tipos de sedimentos aluviales, cubren discordantemente a las rocas sedimentarias marinas fracturadas subyacentes.

4.2 Geología Estructural

La zona que ocupa el acuífero se encuentra en el elemento tectónico conocido como “La Curvatura de Monterrey”, que forma parte de la Sierra Madre Oriental en donde la orientación de los pliegues cambia de dirección regional sureste-noroeste a casi este-oeste a la altura de la Ciudad de Monterrey. En este elemento tectónico, las estructuras son apretadas y forman prominentes sierras alargadas que siguen la orientación de los ejes anticlinales. Esta curvatura está limitada al norte por la falla frontal de la Sierra Madre Oriental y al poniente por el Valle de Saltillo-Ramos Arizpe y el Valle de Agua Nueva. Dentro del área de la curvatura, existen fallas inversas que afectan a pliegues anticlinales y sinclinales; entre las cuales la más importante son la Falla Escobedo-Jamé y Falla Matamoros.

Los anticlinales y sinclinales en la “Curvatura de Monterrey” tienen orientación NW-SE en la porción occidental, los cuales cambian de rumbo casi E-W en la parte oriental, formando así una curva convexa hacia el norte.

4.3 Geología del subsuelo

Para analizar la geología del subsuelo fueron recopilados cortes litológicos de perforaciones exploratorias realizadas principalmente por la extinta Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas. Así como, información geofísica de sondeos eléctricos verticales realizados por Geoexploraciones y Construcciones (1983).

Los pozos con cortes litológicos recopilados esencialmente se localizan en el Valle Los Lirios. Estos pozos revelan un relleno de más de 250 m de espesor al poniente de la población Los Lirios. Los pozos perforados en el flanco sur de Loma El Pozo, indican que a profundidad el flanco sur del Sinclinal Los Lirios se vuelve recostado hacia el sur. Prueba de esto es que el pozo Rancho Manzanera cortó una secuencia de calizas invertida de la Formación Aurora encima de la Formación Cuesta del Cura y está sobre la Formación Indidura. Lo mismo el pozo Rancho Manzanera II que perforó calizas de la Formación Cupido encima de la Formación La Peña.

Por otra parte, los pozos perforados al oriente de la población Los Lirios indican que las lutitas de la Formación Indidura y/o Formación Parras, tiene espesores de más de 250 m en la zona de este sinclinal.

El pozo Jamé II perforado en el Valle San Antonio de las Alazanas, que cortó la secuencia de depósitos aluviales, Formación Taraises y Formación La Casita, a profundidades de 11.5, 203 y 435 m respectivamente, indica que el anticlinal erosionado de la Sierra Las Alazanas se continúa hacia el poniente.

El pozo San José de las Pailas I localizado al oriente del pozo Jamé II, fue perforado sobre este anticlinal cortando calizas de la Formación Zuloaga hasta profundidades de 300 m.

El pozo Los Llanos II, perforó de 0 a 50 m caliches y de 50 a 236 m calizas arcillosas, estas últimas probablemente relacionadas con la Formación Indidura sobre el flanco norte del Anticlinal los Llanos.

Al sureste de este pozo, en el Rancho Cerro En medio existe una perforación exploratoria en donde se observan núcleos □ NQ que indica la continuación de calizas abundantemente fracturadas de la Formación Cupido a más de 250 m de profundidad. La videograbación del interior del pozo 10 de este rancho profundizado a 317 m, revela la presencia de numerosas fracturas y cavernas en la Formación Cupido al menos hasta esta profundidad del pozo.

El pozo Huachichil I perforado en el anticlinal del mismo nombre, cortó hasta su profundidad de 250 m calizas de la Formación Cupido.

El pozo Poleo I, que perforó hasta su profundidad total de 157 m, una secuencia de lutitas calcáreas muy probablemente relacionadas con la Formación Parras, comprueba la existencia del sinclinal cartografiado como El Poleo.

Con base en los SEV's que se han realizado en la zona con profundidad de investigación de 400 m y que forman dos líneas geofísicas orientación suroeste-noreste (plano anexo), se han identificado dos unidades geoelectricas.

La unidad superior con resistividades que varían entre 9 a 258 ohm-m, se ha interpretado como depósitos granulares de relleno de los valles. La unidad inferior con resistividades generalmente mayores que varían entre 15 a 1436 ohm-m, se ha relacionado sistemáticamente con calizas de la Formación Cupido.

La unidad geoelectrica superior efectivamente se relaciona con los depósitos aluviales que rellenan los valles de la región. Los espesores geofísicos de esta unidad son al poniente y oriente del Valle San Antonio de las Alazanas de 100 m y 70 m respectivamente. Al poniente y oriente del Valle Emiliano Zapata, tiene espesores de 150 m y 100 m respectivamente. Al poniente del Valle San Felipe y Valle Huachichil, se reportan espesores geofísicos de hasta 200 m.

La unidad geoelectrica inferior no se puede relacionar sistemáticamente con las calizas de la Formación Cupido. Esto depende de la ubicación estratigráfica y geológica estructural en donde se realizó el sondeo geofísico. Hacia las zonas de sierras anticlinales bien se puede correlacionar con las formaciones Cuesta del Cura, Aurora y/o Cupido.

Pero en los valles sinclinales pueden indicar la presencia de las rocas arcillosas de formaciones del Cretácico Superior. Caso especial, en la parte norte del Valle San Antonio es posible asociarla con la Formación La Casita sobre el anticlinal erosionado San Antonio de las Alazanas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

En la zona existen diferentes tipos de acuíferos que, para el objetivo de la presente publicación de la disponibilidad de agua subterránea, se agrupan en uno sólo denominado acuífero Región Manzanera-Zapalinamé.

Los conglomerados y brechas sedimentarias del Cenozoico, y los depósitos aluviales del Cuaternario, los cuales rellenan los valles y cañones de la región, forman parte uno de los acuíferos de la región. Las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior (Parras, Agua Nueva y San Felipe) por su condición de fracturamiento en los primeros metros, también junto con los depósitos granulares de relleno forman parte de este acuífero en la zona de sinclinales (Cañón La Carbonera, Cañón Los Lirios-El Diamante, Valle Emiliano Zapata, Valle San Felipe, Valle Huachichil y Valle El Poleo). Lo mismos que la Formación la Casita en la zona de anticlinales erosionados (Valle El Carmen, Valle El Tunal, Valle Jamé y Valle San Antonio de las Alazanas).

El fracturamiento de las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, más a profundidad es menos desarrollado y cerrado, reduciéndose con ello la permeabilidad y por lo tanto se comportan como barrera hidráulica entre el acuífero en depósitos de relleno y los acuíferos calizos. Las rocas calizas de las formaciones Zuloaga, Cupido, Tamaulipas Superior-Cuesta del Cura por su gran permeabilidad desarrollada por fracturamiento, planos de estratificación y diversos rasgos de disolución, constituyen otros tres tipos de acuíferos en la zona.

La Formación La Peña por su constitución de calizas arcillosas y lutitas de baja permeabilidad, separa el acuífero de la Formación Cupido del acuífero Tamaulipas Superior-Cuesta del Cura. La Formación Taraises y Formación La Casita por su constitución de rocas arcillosas separan el acuífero de la Formación Cupido del acuífero de la Formación Zuloaga.

La ocurrencia del agua subterránea en los acuíferos calizos está controlada fundamentalmente por factores estructurales. El acuífero de la Formación Cupido se explota principalmente en la parte sur por pozos que se encuentran perforados principalmente sobre los flancos de anticlinales, los cuales en esta parte se caracterizan por capas de calizas de suave inclinación. En la parte norte el plegamiento tiende a ser más intenso en donde factores de capas verticales y pliegues recumbentes, han provocado que varios pozos hayan tenido resultados negativos.

El acuífero de la Formación Zuloaga es explotado por unos cuantos pozos perforados sobre el Anticlinal San Antonio de las Alazanas al norte de la población del mismo nombre. Estos pozos resultaron artesianos con caudales del orden de 50 lps al atravesar el confinante de la Formación La Casita.

El acuífero en depósitos aluviales de relleno es de tipo libre, los acuíferos calizos de la Formación Cupido y formaciones Tamaulipas Superior-Cuesta del Cura son de tipo libre en las sierras conformadas por pliegues anticlinales y es de tipo confinado en los valles sinclinales. El acuífero calizo de la Formación Zuloaga es sensu estricto confinado en la zona.

Las fronteras hidrogeológicas del acuífero se han impuesto con fines de manejo del acuífero en la parte aguas superficiales en donde teóricamente se encuentran las divisorias de aguas subterráneas. Sin embargo, no necesariamente los límites de acuíferos calizos coinciden con los límites de las cuencas hidrológicas. De esta manera, los límites laterales del acuífero son los que a continuación se describen. Al oriente, el parte-aguas superficial que separa las subcuencas San Miguel y San Rafael del estado de Coahuila con las subcuencas Monterrey y El Pílon del Estado de Nuevo León. Al poniente el parteaguas que pasa por los puertos Pelillos, Chapultepec y El Cedrito y que separa las regiones hidrológicas RH-24 y RH-37. Al noroeste, los pliegues anticlinales de la Sierra Zapalinamé. Al norte con la cresta del anticlinal de la Sierra de Arteaga y al sureste con la divisoria política entre el estado de Coahuila y el estado de Nuevo León.

La salida por flujo lateral que tiene el acuífero en la parte poniente del Cañón la Carbonera hacia el Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, constituye otro tipo de frontera del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos del acuífero se tomaron de los resultados de pruebas de bombeo realizadas e interpretadas por la CNA (1997) con un modelo numérico de flujo radial hacia pozo (Rathod y Rusthon, 1984). Estas pruebas de bombeo, también fueron interpretadas con el método analítico de Warren y Root (1963).

Las pruebas de bombeo revelan un comportamiento de acuífero libre en los depósitos aluviales de relleno. En los acuíferos calizos, manifiestan un flujo predominantemente a través de fracturas caracterizado por grandes caudales y bajos abatimientos en típica forma de línea recta.

Los valores de la transmisividad reportados por la CNA (op. cit.) y los obtenidos con el método de Warren-Root (op. cit) en general son del mismo orden de magnitud, variando en un rango de 10^{-4} m²/s a 10^{-1} m²/s.

Los valores del coeficiente de almacenamiento resultaron entre 0.014 y 0.075 para los acuíferos calizos y un valor representativo de 0.0049 para el acuífero en depósitos de relleno.

5.3 Piezometría

En los archivos de esta Gerencia Estatal se tiene un registro que cuenta con 78 piezometrías, con un registro mensual para el periodo de 1974 a 1977 y trimestral para el periodo de 1978 a 1983. Después de 1981 no se tienen datos piezométricos continuos, sino hasta el año de 1993 con que se tiene dos piezometrías para los meses de julio y septiembre. Las piezometrías más recientes fueron realizadas por el Departamento de Aguas Subterráneas de esta Gerencia Estatal y corresponden a septiembre de 1995, noviembre de 1997 y junio-agosto de 1999.

Las últimas piezometrías de los años 1993, 1995, 1997 y 1999, de acuerdo con el análisis de los hidrogramas de la precipitación, fueron realizadas en periodos de sequías. Estos hidrógrafos en general muestran que los niveles estáticos sufrieron poco abatimiento hasta antes del principio de los años ochenta. Los niveles estáticos de las piezometrías de los años 1993, 1995, 1997 y 1999, indican que posiblemente después de los primeros años de los ochenta comenzaron a incrementarse los abatimientos en respuesta a la sobreexplotación del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

Con base en los datos piezométricos del mes de noviembre de 1997, se determinaron configuraciones de profundidad y elevación al nivel estático del acuífero. Para determinar la evolución del nivel estático se consideraron los abatimientos para el periodo noviembre de 1979 a noviembre de 1997.

El año de inicio de este periodo de evolución corresponde al tiempo en que los abatimientos comenzaron a incrementarse significativamente con respecto a los años anteriores, durante los cuales los niveles estáticos se mantuvieron prácticamente estables.

También se elaboró el abatimiento promedio anual a partir del periodo noviembre de 1979 a noviembre de 1997.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Los niveles estáticos para el mes de noviembre de 1997 en el acuífero formado por los depósitos aluviales de relleno y por la cima fracturada y alterada de las rocas arcillosas de formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, se encontraban a las profundidades siguientes.

En el Cañón La Carbonera entre 90 m en el área de San Carlos y 60 m al poniente. En el Valle El Tunal entre 60 m en el centro y 140 m al oriente, En el Cañón Los Lirios-El Diamante entre 20 m y 140 m, los más someros al oriente y hacia el área de los manantiales Los Chorros, y los más profundos inmediatamente al oriente de la población los Lirios y cercano a la población El Diamante. En el Valle Jamé entre 50 m y 70 m. En el Valle que se extiende desde San Antonio de las Alazanas hasta Sierra Hermosa entre 40 m y 180 m, los niveles más someros se registraron en el área de El Coyote y San Ignacio de Abajo, y los más profundos en las áreas de Cuatro Milpas y Sierra Hermosa.

Los niveles estáticos en el acuífero calizo de la Formación Cupido, se encontraban entre 120 m en el área del Rancho Cerro En medio y 160 m en la parte sureste del valle. En el Valle Huachichil entre 120 m en la porción noreste y 220 m en la parte centro-sur del valle.

Cabe mencionar que en el Canón Los Lirios, los pozos perforados en los acuíferos calizos de la Formaciones Cupido y Tamaulipas Superior-Cuesta del Cura, resultaron con niveles estáticos más profundos que los pozos que explotan el acuífero formado por depósitos aluviales de relleno y rocas arcillosas fracturadas de formaciones del Cretácico Inferior.

La perforación exploratoria de Rancho Manzanares y que terminó en calizas, resultó con un nivel estático de 190 m en el mes de agosto de 1993. Por otra parte, la prueba de bombeo realizada por CNA (1997) en el pozo G-026 perforado en calizas, tuvo un nivel estático a 226.4 m de profundidad en el mes de noviembre de 1997. La diferencia de niveles entre los diferentes tipos de acuíferos, comprueba que no existe comunicación hidráulica entre ellos.

Los niveles en el acuífero calizo de la Formación Zuloaga en el área al norte de la población San Antonio de las Alazanas, fueron registrados entre 80 m hacia el noroeste y 200 m al sureste.

La variación de la profundidad al nivel estático en el acuífero en depósitos aluviales de relleno guarda una relación con la topografía del terreno, es decir que los niveles más profundos se presentan en áreas topográficamente más altas y los más someros en áreas topográficamente más bajas. Esta relación no se observa claramente en los acuíferos calizos.

5.4.2 Elevación del nivel estático

El régimen de flujo en el acuífero formado por los depósitos aluviales de relleno y la cima alterada y fracturada de las rocas arcillosas de formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, basado en los niveles estáticos para el mes de noviembre de 1997 a continuación se describe. La elevación al nivel estático en el Cañón La Carbonera que variaba entre 1,800 msnm en la parte poniente y 3,000 msnm en la parte oriente, definía una dirección regional de flujo de oriente a poniente con una componente de salida subterránea hacia el Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe y una entrada por flujo lateral en la parte oriente.

La red de flujo en el Valle El Tunal era cerrada con elevaciones al nivel estático que variaban entre 2,200 msnm en la parte centro oriente y 2,260 en la parte noroeste.

La elevación al nivel estático en el Cañón Los Lirios-El Diamante variaba entre 1,950 msnm hacia la zona de descarga natural de los manantiales Los Chorros y entre 2,000 msnm en el área de la población El Diamante, y entre 2500 msnm al oriente de la población Los Lirios en donde se identifica una entrada por flujo lateral.

Las equipotenciales en el Valle Jamé variaban entre 2,100 msnm al suroeste y 2,350 msnm al sureste, definiendo una entrada por flujo lateral proveniente del Cañón Terihuanes y una salida subterránea hacia el Valle de San Antonio de las Alazanas.

Las cargas hidráulicas en el Valle de San Antonio de las Alazanas variaron entre 1,900 msnm en el área de Cuatro Milpas y 2,250 msnm al sureste de la población San Antonio de las Alazanas. La red de flujo en este valle, señala una entrada por flujo lateral procedente del Cañón Amargos pero no manifiesta salidas subterráneas.

La red de flujo en el Valle Emiliano Zapata, presenta elevaciones del nivel estático entre 1,902 msnm y 1,924 en la parte sureste.

Las cargas hidráulicas más bajas se registraron en el Rancho Cerro En medio debido a la fuerte extracción que ahí se concentra y las más altas en la parte sureste, estableciendo así una dirección de flujo del sureste hacia el área del Rancho Cerro En medio.

La elevación al nivel estático en el Valle Huachichil varió entre 1,840 msnm en la parte centro-sur y 1,890 msnm, con una configuración radial de flujo concéntrico hacia la zona de más fuerte extracción.

Las equipotenciales en el acuífero calizo de la Formación Zuloaga al norte de la población San Antonio de las Alazanas, variaron entre 2,050 msnm y 2,073 msnm, estableciendo una dirección regional de flujo del oriente al poniente. Los gradientes hidráulicos en el acuífero de los depósitos aluviales de relleno variaron entre 0.007 y 0.083.

Mientras que en el acuífero calizo en el Valle Emiliano Zapata era de 0.002 y en el Valle Huachichil de 0.02. Los gradientes más bajos que se presentan en este acuífero calizo en comparación con el acuífero de rellenos, es una clara evidencia de la elevada permeabilidad secundaria que ha desarrollado la Formación Cupido por fracturamiento y carsticidad.

5.4.3 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático en el acuífero compuesto por los depósitos aluviales de relleno y cima alterada y fracturada de las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, para el periodo noviembre de 1979 a noviembre de 1997 fue negativa con valores de abatimientos totales que se registraron entre -10 m y -40 m en el Valle El Tunal, entre -5 m y -20 m en el Cañón Los Lirios-El Diamante, entre -10 m y -15 m en el Valle Jamé, entre -5 m y -50 m en el Valle San Antonio de las Alazanas-Sierra Hermosa.

Para este mismo periodo de evolución piezométrica en el acuífero calizo de la Formación Cupido en el Valle de Emiliano Zapata se registraron abatimientos totales hasta -45 m en el Rancho Cerro de Enmedio. En el acuífero calizo de la Formación Zuloaga al norte de San Antonio de las Alazanas, resultaron abatimientos totales entre -65 m y -75 m.

El abatimiento promedio anual obtenido del periodo noviembre de 1979 a noviembre de 1997 en el acuífero compuesto por los depósitos aluviales de relleno y cima alterada y fracturada de las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, resultó entre -0.5 m/año y -2 m/año en el Valle El Tunal, entre -0.5 m/año y 1.5 m/año en el Cañón Los Lirios-El Diamante, entre -0.5 m/año y -1 m/año en el Valle Jamé, entre -0.5 m/año y -3 m/año en el Valle San Antonio de las Alazanas-El Diamante.

En el acuífero calizo de la Formación Cupido en el Valle Emiliano Zapata se registró un ritmo de abatimiento promedio anual obtenido del periodo noviembre de 1979 a noviembre de 1997, de entre -2 m/año y -3 m/año. En el acuífero calizo de la Formación Zuloaga al norte de San Antonio de las Alazanas, resultaron abatimientos promedios anuales de entre -3 m/año y -4 m/año.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

El análisis hidrogeoquímico y su relación con la calidad del agua subterránea, se fundamentó en la definición de la distribución espacial de las familias de agua y de parámetros químicos indicadores. Para esto, se tomó como referencia los planos de diagramas de Stiff modificados y Nitratos, y se consideraron los datos fisicoquímicos del agua subterránea reportados por CNA (1997).

El tipo de agua que predomina en el acuífero compuesto por los depósitos aluviales de relleno y cima alterada y fracturada de las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, es $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Excepto aguas del tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ que se presentan en la parte centro-oriente del Valle El Tunal, parte poniente del Cañón Los Lirios-El Diamante y parte sureste del Valle San Antonio de las Alazanas, así como las aguas $\text{HCO}_3/\text{SO}_4\text{-Ca/Mg}$ que se tienen en la porción noroeste del Valle San Antonio de las Alazanas. Las aguas bicarbonatadas cálcicas que predominan en este acuífero son producto de la disolución de los sedimentos calcáreos que se encuentran en los depósitos aluviales de relleno y en las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita.

Por otra parte, este tipo de aguas nos indica que la zona de valles y cañones son áreas de recarga natural del acuífero. En cuanto a la presencia de aguas sulfatadas, estas posiblemente se relacionan con efectos de disolución de evaporitas existentes en las rocas arcillosas y/o son indicativas en forma indirecta de actividades agrícolas con fertilizantes en la región.

En el acuífero calizo de la Formación Cupido, también predominan aguas del tipo HCO₃-Ca en el Valle Emiliano Zapata, Valle San Felipe-Chapultepec y Valle Huachichil. En este caso, las aguas bicarbonatadas cálcicas son originadas por la disolución de calcita mineral primario de las rocas calizas de esta formación.

Las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) en el acuífero formado por los depósitos aluviales de relleno y en las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, varían entre 251 mg/l en el Cañón La Carbonera y 2320 mg/l en la parte centro-oriente del Valle El Tunal en donde las aguas son sulfatadas cálcicas. Los contenidos de STD en el acuífero calizo de la Formación Cupido, varían entre 244 mg/l en el Valle San Felipe y 643 mg/l en el Cañón Los Lirios.

La variabilidad de los contenidos de STD, refleja en cierta manera diferentes condiciones de permeabilidad y consecuentemente tiempos de residencia del agua subterránea. Las concentraciones más bajas que se tienen en el acuífero calizo de la Formación Cupido, se relacionan con la elevada permeabilidad que ha desarrollado por fracturamiento y carsticidad. Mientras que la salinidad más alta en el acuífero compuesto por los depósitos aluviales de relleno y rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, puede ser una manifestación de un movimiento más lento del agua subterránea a través de las lutitas y areniscas de la Formación La Casita.

Las concentraciones más altas de nitratos en el agua subterránea se presentan en las siguientes áreas: a) sureste del Valle de Huachichil con concentraciones entre 21.1 mg/l y 50.2 mg/l, b) Valle Chapultepec con un contenido de 18.5 mg/l, c) parte sureste y norte del Valle de San Antonio de las Alazanas con concentraciones de 33.9 mg/l y 46.6 mg/l, d) parte poniente del Valle Jamé en donde se tiene una concentración de 22.9 mg/l, e) Cañón Los Lirios con contenidos que varían entre 17.6 mg/l y 90.2 mg/l, f) Cañón La Carbonera con concentraciones entre 10.6 mg/l y 23.8 mg/l, y g) parte oriente del Valle El Carmen con una concentración de 10.1 mg/l.

Considerando que en la región han prevalecido durante varios años las actividades agrícolas, se interpreta que las altas concentraciones de nitratos pueden indicar contaminación difusa en forma local debido al uso de fertilizantes.

Al respecto, de acuerdo con información proporcionada por SAGAR del estado de Coahuila, en la región se han utilizado en al menos los últimos 10 años los siguientes fertilizantes más comunes para el cultivo de papa, zanahoria, manzana y forrajes: sulfato de amonio, Urea, sulfato de potasio, superfosfato simple, Triple 17 (Na, K y P) y MAP (compuesto nitrogenado). Para comprobar, esta interpretación es recomendable se lleve a cabo otro muestreo hidrogeoquímico en los mismos pozos muestreados por CNA (1997) que contemple análisis de compuestos nitrogenados.

En general el agua de los acuíferos de la región es de buena calidad para uso potable con respecto a cloruros, sulfatos, sólidos totales disueltos y nitratos. Excepto las áreas locales ya mencionadas con altas concentraciones de nitratos que rebasan el límite permisible que marca la normatividad de 10 mg/l. Así como, las áreas locales que rebasan el límite permisible de sulfatos (600 mg/l) y STD (1000 mg/l) para uso potable que encuentran en la parte oriente del Valle El Carmen, centro-oriente del Valle El Tunal y sureste del Valle de San Antonio de las Alazanas.

Como ya se mencionó la principal fuente potencial de contaminación de los acuíferos, es la relacionada con el uso de fertilizantes en las actividades agrícolas que predominan en la región.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Las características de los aprovechamientos que explotan el acuífero se obtuvieron del censo realizado por CNA (1997). Durante la realización de este censo fueron visitados un total de 657 aprovechamientos, de los cuales 651 son pozos, 5 norias y 1 manantial. Del total de pozos 215 fueron inactivos y 436 activos. Dentro de los activos, por el uso del agua el 98% son agrícolas y el 2% restante domésticos y pecuarios.

Los caudales de extracción instantáneos medidos durante el censo de los pozos que explotan el acuífero formado por los depósitos aluviales de relleno y en las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, variaron entre 0.1 lps y 54 lps, el caudal más alto se presentó en la parte oriente del Cañón Los Lirios-Sierra Hermosa.

Los pozos que explotan el acuífero calizo de la Formación Cupido, aportan caudales que varían entre 12 lps y 114 lps, los caudales más bajos se tenían en el Valle Huachichil y los más altos en el Valle Emiliano Zapata específicamente en el Rancho Cerro de Enmedio.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. El balance de aguas subterráneas en su forma más simple, está representado por la expresión siguiente:

$$\text{Recarga Total} = \text{Cambio de Almacenamiento} + \text{Descarga Total}$$

Con base en el funcionamiento hidrodinámico del acuífero analizado en el capítulo de hidrogeología, las componentes de la recarga total consideradas en el balance de aguas subterráneas son: a) infiltración de la lluvia en los depósitos aluviales de relleno de los valles y cañones, y en las rocas calizas que afloran en las sierras de la región, b) infiltración por excedentes de riego agrícola sobre los depósitos aluviales que rellenan los valles y cañones de la región y c) entrada por flujo horizontal en el Cañón la Carbonera, Valle El Tunal, Cañón Los Lirios, Valle Jamé y Valle San Antonio de las Alazanas.

Las componentes de la descarga total son las siguientes: a) descarga natural por manantiales, b) extracción por bombeo y c) salida por flujo subterráneo en la parte poniente del Cañón La Carbonera hacia el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe.

7.1 Entradas

7.1.1 Recarga natural

7.1.2 Infiltración de la lluvia

La infiltración de la lluvia se estimó por diferentes métodos: 1) balance de masas de cloruros, método de Knisel y balance hidrológico.

Balance de masa de cloruros

El método del balance de masa entre el cloruro disuelto en el agua subterránea en la zona de recarga y el cloruro en la precipitación es una relación directamente proporcional a la evaporación a nivel del suelo, y depende de la suposición de que la concentración es constante tanto en el agua subterránea como en la precipitación.

El método está basado en las siguientes hipótesis que son cumplidas para la zona de estudio:

- No se considera que existe contribución del cloruro al agua subterránea debida a la irrigación y/o contaminación.
- No se cuenta con una infiltración de cloruro debido a la acción de formaciones que contengan evaporitas.
- Debido a que los escurrimientos son mínimos no se pierde cloruro por este proceso.

Para aplicar este método se requiere: i) conocer la concentración de cloruros en el agua subterránea en la zona de recarga, ii) estimar el contenido de cloruros en la precipitación y iii) calcular el volumen de agua precipitado en la zona de recarga.

El método del balance de masa de cloruros se fundamenta en la siguiente expresión:

$$R = P(C_p/C_{nf})$$

Donde:

R = Recarga al agua subterránea

P = Precipitación

C_p = Concentración de cloruros en la precipitación

C_{nf} = Concentración de cloruros en el agua de recarga en la superficie del nivel freático

C_p/C_{nf} = Coeficiente de infiltración

Las concentraciones de cloruro en la precipitación varían de acuerdo a la distancia entre el mar y las estaciones de monitoreo. En vista de que no se cuentan con análisis químicos de la precipitación en la zona, se consideró unas concentraciones promedio de 0.8 mg/l reportada por Freese y Nichols (1995) para la estación de Sonora, Texas, que se localiza aproximadamente a 400 km de la costa del Golfo de México. El acuífero se localiza aproximadamente a 320 km de la costa del Golfo de México.

Las concentraciones de cloruros del agua subterránea que se presentan en la tabla anexa correspondiente, fueron tomadas del estudio hidrogeológico realizado por la CNA (1997), considerando que tuvieran un balance de carga entre -10% y +10%.

El método del balance de masa de cloruros, cuyos resultados se presentan en la tabla anexa correspondiente, fue aplicado a toda la zona tomando en cuenta los diferentes tipos de acuíferos y su área de recarga.

De esta manera se obtuvieron coeficientes promedio de infiltración igual al 5% para el acuífero en depósitos aluviales de relleno e igual al 10% para los acuíferos calizos.

La recarga total que resultó de este método químico es de 20.288 hm³/año, de los cuales 4.777 hm³/año se distribuyen en la Región Hidrológica del Río Bravo y 15.511 hm³/año en la Región Hidrológica El Salado.

Método de Knisel

Knisel (1972) diseñó un método para estimar la recarga para acuíferos en rocas calizas en función de la precipitación que obedece a una función gamma doble paramétrica:

$$r(\%) = \frac{122.61p}{5843 + p^2}$$

Donde a es el parámetro de forma y b el de escala, representando la altura media a la cual se inicia el escurrimiento y su desviación estándar respectivamente.

Si se sustituye y por la recarga y x por la precipitación p, la ecuación puede expresarse como sigue:

$$r = \frac{abp}{a^2 + p^2}$$

La evaluación de a y b depende únicamente de la forma de operar, para el presente caso se tomaron los valores propuestos por Tinajero et. al. (1986), que son 76.44 para a y 1.604 para b. Tomando en cuenta lo anterior, la ecuación de r sería:

$$y = \frac{abx}{a^2}$$

Donde r es un porcentaje de la precipitación p.

Para obtener la lámina total de recarga, se multiplican ambos miembros de la ecuación por la precipitación p, por lo que:

$$R(mm) = \frac{122.61p^2}{5843 + p^2}$$

La aplicación de esta ecuación es para registros diarios de precipitación mayores a 6.5 mm (Knisel, op. cit.), para lo cual fueron consultados los reportes meteorológicos diarios generados por esta Gerencia Estatal para estaciones climatológicas localizadas dentro de la zona. La variación anual de la lámina de recarga acumulada para cada una de las estaciones consideradas se presenta en la tabla anexa respectiva. De esta manera se obtuvieron valores promedio que variaron entre 98 mm en la estación Jamé y de 271 mm en la estación Ciénega La Purísima, notándose la influencia de la orografía sobre la magnitud de la recarga.

En acorde con la restricción del método referente a su aplicabilidad a ambientes de rocas calizas, los resultados obtenidos del mismo para la recarga por infiltración de la lluvia a los acuíferos calizos de la zona se presentan en la tabla anexa correspondiente. De tal forma que la recarga total a los acuíferos calizos por infiltración de la lluvia obtenida con este método resultó con un orden de 37 hm³/año

7.1.3. Recarga inducida

7.1.4 Infiltración por excedentes de riego

La recarga difusa que se genera por excedentes de riego en áreas agrícolas, fue evaluada a partir de un balance hidráulico, restándole al volumen aplicado al riego, el uso consuntivo de los cultivos. Las pérdidas por conducción y distribución, se consideraron prácticamente nulas, debido a que la fuente de riego es el acuífero mismo con aprovechamientos que se encuentran dentro de las áreas de riego.

El volumen aplicado al riego se consideró equivalente al volumen de extracción (68.45 hm³/año) destinado al uso agrícola que se obtuvo con la información del censo de aprovechamientos realizado por la CNA (1997). El uso consuntivo se estimó aplicando la ecuación de Blaney-Criddle, para lo cual se utilizaron temperaturas promedio mensual reportadas por esta Gerencia Estatal para las estaciones climatológicas antes mencionadas, mientras que los por cientos de horas de luz y los coeficientes k se tomaron de los publicados por CNA (1994).

Los meses de crecimiento de cada uno de los cultivos que se producen en la región, fueron proporcionados por SAGAR. De esta manera, las láminas netas de uso consuntivo obtenidas para los diferentes cultivos, se aplicaron a las superficies de riego reportadas en el mismo censo realizado por la CNA (op.cit). De esta manera, la infiltración por excedentes de riego resultó en un orden de **16.469 hm³/año**.

7.1.5. Flujo horizontal

Las entradas al acuífero por flujo horizontal que se identifican al oriente del Cañón La Carbonera, Valle El Tunal, Cañón Los Lirios, Valle Jamé y Valle San Antonio de las Alazanas, fue evaluada con base en la ecuación de Darcy expresada de la siguiente forma:

$$Q = (T)(i)(B)$$

Donde:

T = transmisividad del acuífero (m²/s)

i = gradiente hidráulico en el canal de flujo (adimensional)

B = ancho del canal (m)

El caudal de entrada fue evaluado fundamentado en el plano de elevación al nivel estático para el mes de noviembre de 1997. Los valores de transmisividad reportados en el estudio de la CNA (1997) fueron los que se emplearon en los cálculos de los flujos de entrada.

De lo anterior, se obtuvo un caudal total de entrada por flujo horizontal del orden de 0.336 m³/s, que equivalen a un volumen de **10.6 hm³/año**.

7.2 Salidas

7.2.1 Descarga natural por manantiales

En la parte oriente del Cañón Los Lirios-El Diamante antes del comienzo del Cañón Los Chorros, existen una serie de manantiales conocidos como Los Chorros, los cuales surgen en el contacto entre un conglomerado calizo del Cenozoico con lutitas de la Formación Parras subyacente. Sus caudales de descarga varían entre 12 lps y 50 lps (Lesser y Asociados, 1996) y en conjunto aportan un volumen de descarga anual del orden de **1.96 hm³/año** que es utilizado para riego en el ejido de Arteaga.

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

El volumen total de extracción anual del Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé, fue tomado del reportado por CNA (1997) con base en el censo de aprovechamientos que realizó. El volumen de extracción de cada aprovechamiento se obtuvo considerando su tiempo de operación y el caudal de extracción instantáneo. También se tomó en cuenta el tipo de cultivo, superficie regada y lámina de riego, en el caso de aprovechamientos para uso agrícola que predomina en la región.

De esta forma resultó un volumen total de extracción de **70 hm³/año**, de los cuales 68.45 hm³/año se destina al uso agrícola, 1.48 hm³/año al uso doméstico y 5.6 hm³/año al uso pecuario.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

La descarga del acuífero por flujo subterráneo que se da en el extremo poniente del Cañón La Carbonera hacia el Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, fue evaluada aplicando la expresión descrita anteriormente de la ecuación de Darcy. En el plano de elevación del nivel estático para el mes de noviembre de 1997, se marcan la celda 1 considerada para estimar la salida por flujo subterráneo. El valor de transmisividad utilizado es uno de los reportados de pruebas de bombeo realizadas por la CNA (1997). De la metodología anterior resultó un caudal de salida del orden de 0.051 m³/s que equivale a un volumen de **1.61 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

El cambio de almacenamiento considerado en el balance de aguas subterráneas, fue determinado con base en el plano de abatimientos promedio anual obtenidos de los abatimientos totales para el periodo de balance noviembre de 1979 a noviembre de 1997. Para esto fue necesario medir las superficies con diferente abatimiento por medio de planimetría. Debido a la falta de pruebas de bombeo con pozo de observación fueron utilizados coeficientes de almacenamiento de 0.01, 0.05 y 0.1 para el acuífero en depósitos aluviales de relleno en función de la litología y tipo de acuífero libre.

Para el caso del acuífero calizo de la Formación Cupido, fueron aplicados coeficiente de almacenamiento de 0.036 y 0.075 reportados por CNA (1997) a partir de pruebas de bombeo realizadas con pozos de observación. Del procedimiento antes descrito se llegó a un cambio total de almacenamiento del orden **-18.40 hm³/año**.

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:

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

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

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el acuífero la descarga natural comprometida es de **3.6 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **89,741,433 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 55.2 - 3.6 - 89.741433 \\ \text{DMA} &= -38.141433 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **38,141,433 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

C.N.A., 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos.

C.N.A., 1996. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

C.N.A., 1997. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. 3ª Edición.

C.N.A. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, "Que establece las disposiciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales".

Geoexploraciones y Construcciones, S. A., 1983. Estudio Geohidrológico Regional del Area San Juanito-Zapalinamé, Coahuila. Realizado para la SARH.