

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL CARRIZO (2514), ESTADO DE
SINALOA**

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	8
3.1 Provincia fisiográfica	8
3.2 Clima	9
3.3 Hidrografía.....	10
3.4 Geomorfología	11
4. GEOLOGÍA.....	13
4.2 Estratigrafía.....	14
4.2 Geología estructural	19
4.3 Geología del subsuelo	20
5. HIDROGEOLOGÍA	21
5.1 Tipo de acuífero.....	21
5.2 Parámetros hidráulicos	21
5.3 Piezometría.....	22
5.4 Comportamiento hidráulico	22
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	23
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1 Entradas.....	25
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	25
7.1.2 Retornos de Riego (Rr)	26
7.2 Salidas.....	26
7.2.1 Evapotranspiración (ETR)	26
7.2.2 Bombeo (B)	28
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	29
8. DISPONIBILIDAD	29
8.1 Recarga total media anual (R)	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA.....	32

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 El Carrizo, definido con la clave 2514 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al noroeste del estado de Sinaloa, entre los paralelos 25° 56' y 26° 26' de latitud norte y entre los meridianos 108° 49' y 109° 27' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,805 km².

Limita al norte con el estado de Sonora, al este y sur con el acuífero Río Fuerte, en Sinaloa, y al oeste con el Golfo de California (figura 1).

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2514 EL CARRIZO							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	108	51	35.0	26	25	56.7	
2	108	52	16.4	26	23	40.0	
3	108	54	10.3	26	21	42.4	
4	108	52	31.1	26	17	50.9	
5	108	49	11.7	26	14	30.1	
6	108	51	31.0	26	5	38.6	
7	108	57	51.7	26	0	56.4	
8	109	20	1.4	26	0	21.3	
9	109	26	38.7	25	56	5.7	DEL 9 AL 10 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
10	109	15	27.9	26	19	8.6	DEL 10 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	108	51	35.0	26	25	56.7	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Cañas pertenece a la Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte que se localiza en el noroeste de la República Mexicana y comprende el Estado de Sinaloa en su totalidad, ocho municipios de Chihuahua (Guadalupe y Calvo, Morelos, Batopilas, Guachochi, Urique, Chinipas, Guazapares y Maguarichi), 16 municipios del estado de Durango (Topia, Canelas, Tamazula, Otaez, San Dimas, Pueblo Nuevo, Mezquital, Durango, Nuevo Ideal, Canatlán, Panuco de Colorado, Guadalupe Victoria, Poanas, Nombre de Dios, Vicente Guerrero y Súchil), 2 municipios de Zacatecas (Sombrerete y Chalchihuites) y 7 municipios de Nayarit (Huajicori, Acaponeta, Tecuala, Rosamorada, Santiago Ixcuintla, Ruiz y Tuxpan). Su extensión territorial es de 167,821 km² y representa el 8.2% del territorio nacional.

Específicamente dentro de la zona que comprende el acuífero El Carrizo, está en vigor el decreto de veda tipo III “Distrito de Riego Río Fuerte Sinaloa y Sonora”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 25 de agosto de 1956, para regular las extracciones del acuífero Río Fuerte. El decreto establece que *“excepto cuando se trate de usos domésticos, a partir de la fecha en que este decreto se publique en el “Diario Oficial” de la Federación, nadie podrá efectuar nuevos alumbramientos de aguas del subsuelo en la zona vedada, ni modificar los existentes, sin previo permiso escrito de la Comisión del Río Fuerte, la que sólo lo expedirá en los casos en que de los estudios correspondientes se deduzca que no se causarán los daños que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse”*.

Dentro de los límites del acuífero existe el Distrito de Riego No. 76 “Valle del Carrizo”, cuyos usuarios actualmente están administrativamente constituidos en módulos de riego, y pertenecen al Consejo de Cuenca Río Fuerte-Río Sinaloa.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso de agua subterránea en el acuífero El Carrizo es prácticamente nulo, la poca extracción es para uso doméstico y pecuario.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En 1978, **La empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A.**, bajo el contrato No. GZA-78-31, realizó el estudio denominado **“Evaluación de Acuíferos en la Zona Fuerte-Sinaloa”**,

Llevando a cabo la actualización del censo de obras de aguas subterráneas del acuífero del río Fuerte, que en esas fechas incluía al Valle del Carrizo, registrando un número total de 440 alumbramientos, de los cuales 224 estaban activos y 216 e inactivos. Del total de obras, principalmente norias, 200 se ubicaban en la margen derecha del río El Fuerte.

Algunas de ellas se localizaban en el Valle del Carrizo, eran norias profundas ubicadas en la parte alta del valle y en la serranía, donde se extraían caudales mínimos de 2.5 lps que se utilizaba principalmente para los usos de abrevadero y doméstico.

Las profundidades de los niveles estáticos al mes de abril de 1978, fueron mayores a los 30 m cerca de las fronteras impermeables y en el Valle de El Carrizo. En la configuración efectuada al final del período de estiaje en este año y comparada con la de 1968, no se observa un cambio apreciable en los niveles estáticos, por lo cual se considera que los niveles del agua subterránea no han sufrido modificaciones con respecto al tiempo, lo que es debido en parte a los abundantes escurrimientos de agua superficial **y a la prácticamente nula extracción de agua subterránea.**

En el año 2000, la **Comisión Nacional del Agua, a través de la Gerencia Regional Pacífico Norte y el Distrito de Riego No. 076, Valle del Carrizo, Sinaloa**, elaboran un **“Plan de acción para la Rehabilitación y Modernización del Distrito de Riego”**, en donde resalta lo siguiente:

El Distrito de Riego N° 076, Valle del Carrizo, se creó mediante acuerdo presidencial el 8 de junio de 1965, publicado en el diario oficial de la federación el 30 de junio del mismo año, e inicio su operación el año de 1969. Fue transferido a los usuarios en 1991, los cuales se organizaron en 4 módulos de riego agrupados en una sociedad de responsabilidad limitada. Posteriormente, fueron incorporados al distrito los módulos números 5, 6, y 7, los cuales también fueron transferidos a los usuarios.

Tiene una superficie de 45,000 has de las cuales se riegan alrededor de 43,259, mediante aguas superficiales provenientes del arroyo Álamos y sus afluentes que son almacenadas por la presa Josefa Ortiz de Domínguez con una capacidad útil de 513 millones de metros cúbicos (hm^3), así como las que se transfieren de la presa Miguel Hidalgo y Costilla, a través de dos canales de interconexión entre ambos almacenamientos.

Dentro de la infraestructura hidráulica existente en el Distrito de Riego, se cuenta con la presa de almacenamiento Josefa Ortiz de Domínguez, 57.94 km de Canales Principales de Conducción, de los cuales 34.16 km son revestidos y 23.78 km están sin revestir; así mismo se tienen 11 Diques a lo largo del tramo de conducción, lo que permite una importante recarga al acuífero.

El agua que se utiliza para todos los usos proviene únicamente de la presa Josefa Ortiz de Domínguez. La calidad química de esta agua es buena, apta para todos los usos. Hasta la fecha, la región no cuenta con infraestructura hidráulica para la extracción de aguas subterráneas.

En el período 1989-1999 se extrajo un promedio anual de 590 hm^3 de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, entregados a la Sociedad de Responsabilidad Limitada y a los Módulos de Riego.

En la red de conducción del Distrito de Riego la eficiencia es de 90.00 %. En cambio, la eficiencia de aplicación del agua en los suelos del valle a nivel parcelario es de alrededor del 54.0 %.

Para el año 2002, la longitud total de canales de distribución del Distrito de Riego era de 744 km y la de drenaje en 602 km, de los cuales el 75% son canales en tierra; además existían 8200 ha de suelos salinos.

Por otra parte, estudios recientes realizados por administración, arrojan los siguientes resultados:

Con el inicio de la práctica de la irrigación en el Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, uno de los principales problemas que se generaron de manera inmediata, fue la salinización de los suelos, afectando la productividad de las tierras hasta volverlas inutilizables, como resultado de la presencia de mantos freáticos someros que favorecen el transporte de las sales a la zona de raíces y la alta evaporación que provoca su precipitación, iniciándose el proceso de acumulación sales en el perfil del suelo hasta niveles intolerables para los cultivos.

La superficie promedio con niveles freáticos críticos, de 0.0 – 1.5 m de profundidad, presentes durante el periodo 1991-1998 fue de 24,441 ha, que corresponde al 56.5% de la superficie estudiada. A partir de 1995 inicia la instalación de drenaje subterráneo parcelario entubado de tal manera que para fines del año 2004 11,991 ha contaban con este tipo de obras.

El proceso de salinización de los suelos se debe a las continuas fluctuaciones de los niveles freáticos, mismos que se ven favorecidos por los volúmenes infiltrados a través del perfil del suelo y por el manejo deficiente del agua a nivel parcelario, ya que el 97% de la superficie se riega por gravedad y aun cuando las tierras han sido niveladas durante varios ciclos agrícolas, el trazo de riego no se ha modificado, se observan longitudes de surcos que oscilan entre los 200 y 500 m. en todo el distrito y arrastre de suelo por los excedentes de riego, lo que indica que la longitud y pendiente no es la recomendable.

El período en que se presentan los niveles freáticos más elevados corresponde a los meses de febrero-abril, que coincide con la etapa de mayor demanda de agua de los cultivos establecidos durante el ciclo otoño-invierno. En este período el nivel freático crítico (profundidad de 0 a 1.5 m) en el año 2002 afectó a 21,803 ha., reduciendo su rendimiento y creando problemas de salinidad. Por el contrario, durante el mes de octubre, cuando inicia el ciclo otoño-invierno, se presentan los niveles freáticos menos críticos en la mayor parte de la superficie del distrito debido a que los niveles freáticos se abaten a profundidades mayores de 1.5 m.

Con base en el estudio general de freatimetría, los planos generados de isobatas, isohipsas, líneas de corriente, así como observaciones directas en campo, es posible determinar la existencia de zonas de recarga del nivel freático, como son la red de distribución que prácticamente en su totalidad se encuentra construida en tierra; se ha identificado además la existencia de algunas zonas de recarga como consecuencia de las filtraciones de los canales principales, laterales, sublaterales y ramales, mismos que se mantienen con tirantes elevados en la época de mayor demanda de agua, para poder abastecer la demanda de riego de los cultivos.

Las corrientes de aguas freáticas se comportan de manera similar a la topografía del terreno, de tal manera que las partes altas presentan suelos más permeables y de topografía con mayor pendiente en las que se tienen las mayores pérdidas tanto en conducción como en sobre-riego. Estas corrientes se dirigen a las zonas más bajas que son más planas y de menor permeabilidad, provocando el ascenso de los niveles freáticos.

Es importante mencionar que en este distrito de riego la red de drenaje y de conducción está bien conservada; sin embargo, existen drenes paralelos a los canales que incrementan las pérdidas por conducción. Con este propósito, se cuenta con una red de 234 pozos de observación de niveles freáticos que permiten determinar la dirección de los flujos y con esta información emitir recomendaciones sobre la dirección de las acciones preventivas o correctivas en su caso.

En el año 2005, la **Gerencia Regional Pacífico Norte**, a través de la Jefatura de Proyecto de Aguas Subterráneas de la Subgerencia Técnica, llevó a cabo **trabajos de campo** en el acuífero El Carrizo, consistentes en censo de obras, recorrido piezométrico y muestreo del agua. Con la información piezométrica recabada se elaboraron las configuraciones del nivel estático correspondientes y se planteó el balance de aguas subterráneas para estimar la recarga media anual.

Con esta información se determinó su disponibilidad conforme a la norma NOM-011-CNA-2000. Este último trabajo fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentarán en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El estado de Sinaloa muestra en su expresión superficial relieves planos que van desde el nivel del mar en la zona costera, hasta elevaciones abruptas superiores a los 2,000 m sobre el nivel del mar (msnm), de la Sierra Madre Occidental, en los límites con los estados de Chihuahua y Durango. En el acuífero El Carrizo, las elevaciones topográficas son inferiores a los 400 msnm en la parte alta y menores a los 50 en la parte del Valle.

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de E. Raíz (1954 y 1964), el estado de Sinaloa se encuentra dentro de dos provincias fisiográficas, una zona de planicie y otra montañosa; para efectos de la descripción de la zona, se considera que el acuífero comprende las provincias fisiográficas Sierra Madre Occidental, que es donde se genera la recarga, y la Llanura Costera de Sinaloa, sitio donde se encuentra localizado el acuífero El Carrizo. La provincia de la Sierra Madre Occidental está situada en la parte oriental del estado de Sinaloa, tiene un ancho medio de 30 a 50 km; el promedio de elevación en esta región varía de 2,000 a 2,700 msnm; se caracteriza por su constitución ígnea. El rasgo fisiográfico más importante de esta provincia se encuentra representado por las subprovincias que a continuación se mencionan:

Las altas Mesetas Riolíticas incluyen un área extensa y tiene grandes elevaciones que presentan ondulaciones e inclinaciones preferentemente al occidente. La mayor parte de estas mesetas están formadas por derrames piroclásticos de composición riolítica, con una topografía abrupta debido al gran número de cañones que la disectan.

Las Sierras Sepultadas se extiende a lo largo de las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit, con una dirección NW-SE. Los acarrees provenientes del flanco oeste de la Sierra Madre Occidental sepultan gran parte de la región montañosa del borde occidental, de tal manera que solamente las cimas y picos de las sierras sobresalen como cerros aislados.

Estas se localizan entre las Altas Mesetas Riolíticas y la Planicie Costera, son montañas sepultadas parcialmente y adquieren hacia al oriente elevaciones del orden de 150 m. Las rocas de esta franja son jóvenes, ya que es fácil reconocer sobre las lavas, los centros de los focos de erupción y sus formas bien conservadas.

La provincia de la Llanura Costera del Estado de Sinaloa está comprendida en las subprovincias de Deltas y Costas de Sinaloa, de la provincia fisiográfica Cordilleras Sepultadas; comprende prácticamente la mayor parte de la zona del acuífero Río Culiacán.

La fisiografía de la Llanura Costera, está caracterizada por abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, rías, depósitos eólicos y marinos; los cuales pueden ser agrupados en unidades fisiográficas en cuanto al ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtos o de transición, eólicos y marinos.

3.2 Clima

Dentro de la Región Hidrológico-Administrativa Pacífico Norte, el notable contraste entre las elevaciones topográficas de la porción costera y de la zona montañosa, y la situación geográfica de la misma respecto del trópico de Cáncer, originan que en la zona se diferencien varios tipos de climas en áreas de forma irregular, paralelas entre sí, orientadas sensiblemente de norte a sur y ubicadas en forma diagonal a la línea de costa.

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta Garcia en 1981 para las condiciones particulares de la República Mexicana, el clima que prevalece en la cuenca hidrológica en que se localiza el acuífero, está compuesta por una variedad de climas.

Clima muy extremoso, cálido semiseco en la parte alta del acuífero El Carrizo y cálido seco el resto de la zona, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura media del mes más frío mayor de 17°C, con una oscilación anual entre las temperaturas medias mensuales mayor a 17 °C y menor a 32 °C. El régimen de lluvias es de verano y lluvias invernales que representan menos del 5% de lluvia total anual. Dentro de la superficie que abarca el acuífero El Carrizo se encuentra localizada la estación “El Carrizo”, que cuenta con registro de información para el periodo 1966-2005, ubicada en el poblado El Carrizo ó Gustavo Díaz Ordaz, siendo esta estación la de mayor influencia sobre el área.

La temperatura media anual oscila entre los 22.8 y 25.4° C, exhibiendo sus valores más bajos en los meses de diciembre, enero y febrero, con valores un poco mayores a 17° C; mientras que las temperaturas más altas se registran en periodo junio-septiembre, coincidiendo con los meses de las lluvias de verano, siendo los meses de julio y agosto los que registran la mayor temperatura, con un valor de 31.1° C.

La precipitación media anual de la región es de 365 mm, muy por abajo del promedio nacional. La distribución estacional muestra que durante la temporada de lluvias, que va de julio a septiembre, se concentra la mayor parte de la precipitación, alcanzando valores promedios mensuales de hasta 92.7 mm, registrados en el mes de agosto, mientras que durante la época de estiaje la lluvia disminuye considerablemente, hasta tomar valores prácticamente nulos, cercanos a 1 mm, registrados en los meses de abril y mayo para un valor acumulado menor a los 15 mm, durante el período de estiaje.

Con respecto a la evaporación potencial existente dentro de la zona, se puede observar que la estación muestra una evaporación continua durante todo el año con valores anuales acumulados que superan los 3576 mm, y valores mensuales que van desde los 88, en el mes de febrero, hasta los 290 mm, en el mes de julio.

3.3 Hidrografía

En esta zona del valle del Carrizo no existen ríos ni arroyos importantes que lo crucen, la cuenca donde se encuentra este valle es drenada través de corrientes de tipo dendrítico cuya cuantía durante el estiaje es prácticamente nula. En su desembocadura y junto a la línea costera, a lo largo de la unidad acuífera, existen lagunas de agua salada y marismas comunicadas con el Océano Pacífico por medio de esteros (estuarios), en la “Bolsa de Tosalibampo”.

De acuerdo con la división territorial en regiones hidrológicas, el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, está conformado por las regiones números 10 y 11; el acuífero

El Carrizo se localiza dentro de la primera, denominada Región Hidrológica No. 10, Río Fuerte-Río Piaxtla, siendo el río Fuerte el más grande y caudaloso del estado de Sinaloa. El drenado de los escurrimientos de todas estas corrientes superficiales del estado es hacia el Océano Pacífico. Para fines de planeación, la Región Hidrológico-Administrativa Pacífico Norte se dividió en cinco subregiones: Subregión Norte, Subregión Centro-Norte, Subregión Centro-Sur, Subregión Tuxpan y Subregión Valle del Guadiana. El acuífero El Carrizo pertenece a la subregión de planeación Centro- Norte, presenta condiciones de disponibilidad y abarca una pequeña porción del norte de Sinaloa y sur de Sonora, marcando en parte el límite entre ambos estados.

3.4 Geomorfología

Dentro de la zona se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: lomeríos, sierras, mesetas, abanicos aluviales, cauces fluviales, valles deltáicos, rías, estuarios, lagunas litorales, bermas, manglares, dunas y playas, las cuales se describen a continuación:

Lomeríos. Se encuentran prácticamente en toda el área y se han desarrollado a partir de rocas graníticas y clásticas. Son de formas suaves, alcanzando alturas máximas de 50 m y en general presentan un relieve moderado.

Sierras. Formadas por rocas volcánicas, presentan pendientes fuertes y formas abruptas e irregulares, constituyendo las estribaciones de la Sierra Madre Occidental.

Mesetas. Las rocas volcánicas que forman la región, en ocasiones presentan sus estructuras primarias poco erosionadas, originando la formación de mesetas con leves inclinaciones hacia el poniente y flancos abruptos.

Abanicos aluviales. Desarrollados entre las partes altas y los valles, son de extensión reducida y debido a su forma suelen confundirse con depósitos de talud.

Cauces fluviales. Los cauces de los ríos llegan a medir varios metros de ancho que son inundados en lluvias extraordinarias, presentan forma plana y bajo gradiente, lo cual ocasiona que dentro de ellos el río divague y propicie la formación de meandros.

Dentro de los cauces se han desarrollado terrazas debido a la erosión y depósito de material que efectúa el río dentro del cauce.

Valles deltaicos. Estos se forman en las márgenes de los cauces, son de forma plana, pendiente suave hacia el mar y sobre ellos se han desarrollado meandros, los cuales en ocasiones contienen agua dando lugar a la formación de pequeñas lagunas semicirculares de escasa profundidad.

Rías. Corresponden a zonas bajas inundables, localizadas en las desembocaduras de las corrientes hacia el mar o lagunas litorales.

Estuarios. La desembocadura de los ríos al mar produce ensanchamientos en forma de embudo, debido a la influencia de las mareas y a las crecientes de los ríos.

Lagunas litorales. Representan cuerpos de agua aislados del Océano formados por la acumulación de sedimentos transportados por los ríos y retrabajados por el mar.

Bermas. Dentro de la zona costera, fuera de la desembocadura de los ríos, se presentan las bermas o antiguas líneas de costa, son franjas de 50 a 300 m de ancho, formando leves ondulaciones cuyas partes bajas se encuentran por lo general encharcadas.

Manglares. Los bosques de manglar no están bien desarrollados, se encuentran restringidos principalmente al área de estuarios, esteros, cauces y porción de tierra adentro de barreras arenosas de las lagunas litorales.

Dunas. Las dunas constituyen depósitos eólicos de sedimentos aportados por el mar y transportados por el viento; constituyen cordones continuos con alturas variables. Existen dos tipos predominantes: *activas* y *estabilizadas*. Las activas son formas acrecionales originadas por la acción del viento al actuar sobre material aportado recientemente por el mar, bajo condiciones normales.

Las dunas activas se localizan en la parte inferior de la playa subaérea y fuera de la influencia del oleaje y marea, son inestables y migran rápidamente al impulso del viento. Las dunas estabilizadas están constituidas por sedimentos arenosos alejados de la costa y fuera de la fuente de sedimentos, han sido invadidas por la vegetación y adoptan formas parabólicas.

Playas. En general son amplias, de pendiente suave y uniforme, constituidas por sedimentos arenosos de grano fino a grueso. El aporte marino de material sedimentario en las costas es suficiente, por lo que las playas siempre mantienen sus características arenosas.

4. GEOLOGÍA

El marco geológico de Sinaloa está conformado por litologías muy complejas con variaciones espacio-temporales muy marcadas en su distribución, las cuales cubren desde el Mesozoico hasta el Reciente. El área se caracteriza por afloramientos de rocas ígneas, y en menor proporción rocas metamórficas (figura 2). Excepto las rocas sedimentarias continentales, las rocas existentes han sido afectadas por movimientos tectónicos y actualmente se encuentran bajo un intenso proceso de intemperismo.

Las rocas ígneas extrusivas consisten en derrames lávicos, como brechas y tobas de composición variable, formadas durante el período Terciario.

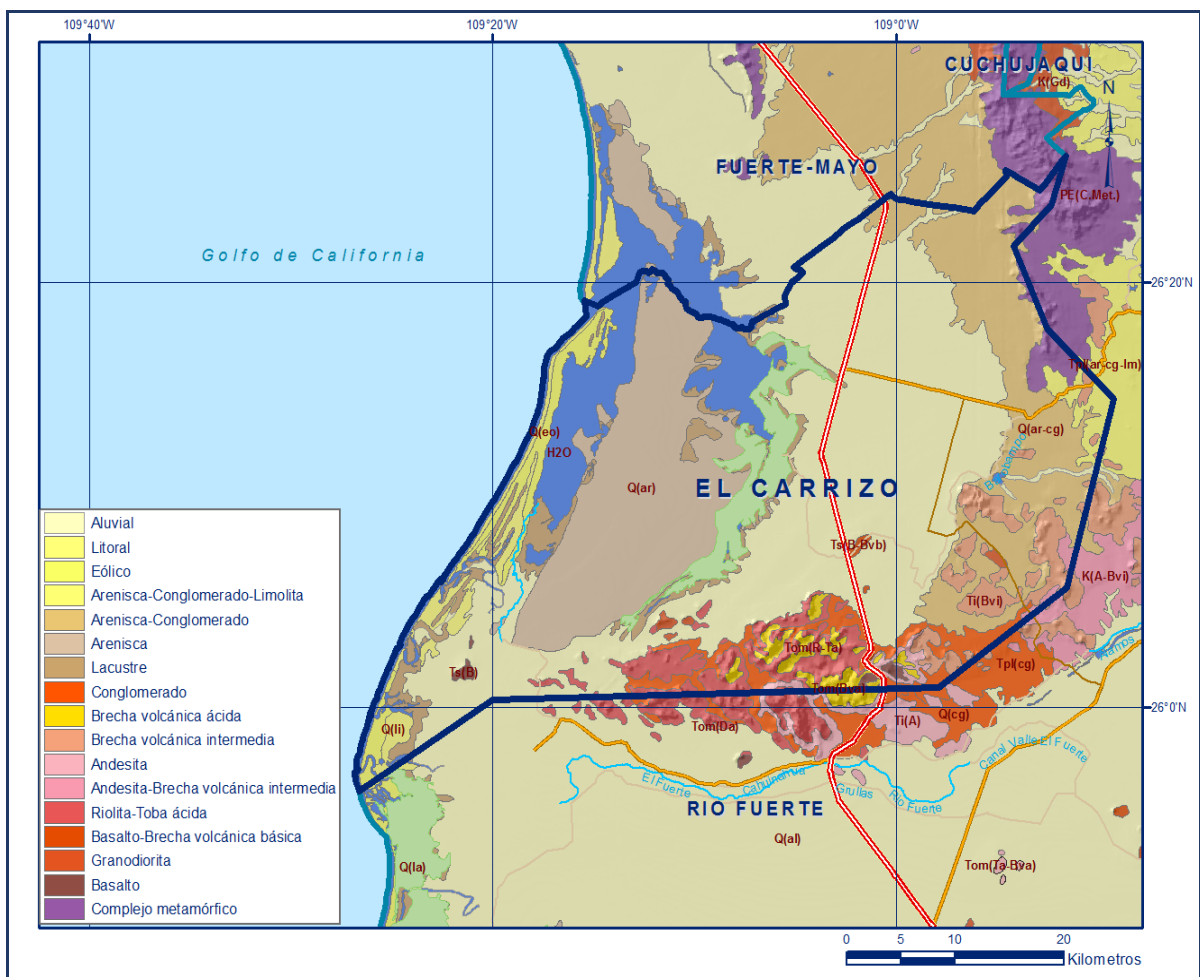


Figura 2. Geología general del acuífero.

Por lo que respecta a las rocas sedimentarias, éstas consisten en conglomerados, areniscas y clásticos de diversos tamaños los cuales forman los pies de monte y abanicos aluviales. Se tienen también gravas y arcillas de origen fluvial que forman deltas, bermas y dunas. Las rocas metamórficas del área corresponden a corneanas y rocas metavolcánicas.

El relieve producto de las formaciones tiende a ser muy variado, encontrándose lomeríos, sierras de materiales volcánicos y llanuras costeras formadas por depósitos sedimentarios continentales. Con excepción de los materiales del Reciente, las demás unidades se consideran impermeables para fines hidrogeológicos.

4.1 Estratigrafía

A continuación, se describen las distintas unidades litológicas en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente:

Mesozoico Metamórfico: Son rocas corneanas de albita y rocas metavolcánicas feldespaticadas con diferentes grados de metamorfismo bajo a nulo.

Unidad Terciaria Inferior Básica: Los materiales andesíticos parecen ser la unidad inferior y se encuentran usualmente en la base de prominencias topográficas. Aparentemente cubren el terreno metamórfico en discordancia angular y también a la caliza del Paleozoico. Las andesitas están asociadas y cubiertas por material de composición riolítica.

Esta unidad no muestra una morfología distintiva. Generalmente se presenta en forma de colinas bajas y onduladas, intensamente falladas y fracturadas como producto de la intensa deformación y alteración causada por intrusivos.

La litología más característica de esta unidad son las lavas andesíticas con textura porfídica de color violeta, lavas de la misma composición con textura afanítica, tobas, aglomerados, sedimentos híbridos, andesita basáltica y en algunas localidades rocas intermedias y ácidas interestratificadas con las descritas anteriormente, las cuales se encuentran generalmente alteradas y oxidadas.

Unidad Terciaria Inferior Volcánica: Se designa con este nombre a una secuencia de rocas volcánicas, constituidas por derrames y brechas de composición andesítica a riolítica, tobas riolíticas y areniscas tobáceas que muestran fuertes inclinaciones. La morfología más característica de esta unidad es la de bloques escarpados con inclinaciones en diversas direcciones, en algunas partes es común encontrarla sumamente erosionada.

Litológicamente consiste de andesitas, tobas andesíticas, areniscas tobáceas oxidadas, así como escasos afloramientos de dacitas, basaltos, y en menor proporción derrames riolíticos; aunque también existen aglomerados, brechas y piroclásticos de composición intermedia. Asociados frecuentemente a esta unidad y estratigráficamente abajo, se encuentran algunos vitrófidos de color negro.

Unidad Terciaria Inferior Ácida: Está formada por una secuencia de derrames riolíticos, tobas y areniscas conglomeráticas. Las rocas de esta unidad son principalmente riolitas, riodacitas y tobas de las mismas composiciones, lateralmente se encuentran también dacitas y andesitas.

Se observan estructuras vesiculares y amigdaloides siendo conspicuas las estructuras de flujo. Las estructuras de flujo forman una secuencia de planos verticales o inclinados en ángulos fuertes.

Con frecuencia estos planos de flujo se observan formando pliegues primarios. Existe gran variedad de litologías en la unidad, siendo la más generalizada la formada por andesitas basálticas, traquitas y riolitas, todas ellas con sus respectivas tobas y areniscas tobáceas e ignimbrita.

Unidad Terciaria Media Vulcanoclástica: Secuencia de rocas de origen vulcanoclástico formadas por areniscas, limos, areniscas tobáceas, conglomerados, aglomerados, tobas y lavas ácidas, la mayor parte de ellas de color rojizo a verdoso.

La morfología de esta unidad es irregular coexistiendo el relieve anguloso con valles bien desarrollados, especialmente hacia la planicie costera. La litología consiste, en una secuencia de conglomerados, arcosas, tobas, subarcosas, tobas arenosas y tobas líticas. Se presentan como estratos tabulares de espesores que varían de 3 a 30 cm como intercalaciones conglomeráticas, en espesores variables de unos centímetros a varios metros; pueden reconocerse estructuras primarias como son: grietas de lodo, gotas de lluvia, horadaciones, estratificación cruzada, estratificación gradual y otros; también pueden identificarse estratos limotílicos y lutíticos.

Unidad Terciaria Superior Acida: Este nombre designa a las rocas volcánicas más jóvenes de composición riolítica, litológicamente esta unidad consiste en lavas y rocas piroclásticas de composición riolítica. Una parte importante de esta unidad está constituida por ignimbritas.

La riolita, es por mucho la litología volcánica más extendida en el área, cierta variedad de texturas han sido observadas en diques, tobas y flujos, predominando unas sobre otras. La riolita tiene una estructura fluidal que consiste en una masa obscura de grano fino entre lentes y trazas de color rosa y ocasionalmente en fenocristales de feldespato. Fisiográficamente esta unidad es muy distintiva, pues forma grandes mesetas inclinadas generalmente hacia el poniente.

Datos radiométricos de rocas de esta unidad indican una edad de 13 millones de años, por lo que probablemente representan el intervalo comprendido entre la parte superior del Terciario Medio y la inferior del Terciario Superior.

Unidad Terciaria Clástica: Esta Unidad consiste de un espesor considerable de limos, areniscas tobáceas y conglomerados con horizontes delgados de piroclásticos y en ocasiones con lavas. Las rocas sedimentarias parecen haber sido en todos los sitios ricas en material volcánico. Los bancos de material andesítico e ignimbrítico son tan comunes como los de granito.

En muchos lugares la matriz de grano fino parece haber sido proveniente de los depósitos ignimbríticos, los cuales alguna vez probablemente cubrieron grandes regiones del área. Sin embargo, los cantos y fragmentos menores de granito han sido encontrados casi en cualquier lado, excepto en los contactos cercanos a los de otras rocas.

Las rocas de esta unidad descansan en discordancia sobre rocas más antiguas que el Terciario. En muchos de los puntos su contacto es tectónico, en otros descansa erosionalmente sobre rocas de la unidad intrusiva ácida. La edad de las partes bajas de la unidad terciaria clástica y altas de la unidad terciaria inferior volcánica o unidad terciaria ácida no pueden ser muy diferentes; quizá se ajuste más a la verdad el considerar un paso transicional entre la mayoría de las unidades terciarias, tanto vertical como lateralmente.

Unidad Terciaria Superior Básica: Con este nombre se designa la unidad compuesta principalmente por brechas y derrames basálticos, y en menor proporción rocas latítico-andesíticas que forman la parte superior de la secuencia volcánica del área. A diferencia de las unidades anteriores, esta unidad presenta algunos aparatos volcánicos aún reconocibles debido a que se trata de rocas jóvenes. Esta unidad tiene dos miembros, el miembro inferior es un basalto de olivino, con estructura vesicular; el miembro superior, es una brecha basáltica. Esta brecha está constituida por fragmentos, desde pequeños hasta de un metro de diámetro, englobados en una matriz tobácea.

Observados al microscopio se trata de basaltos de olivino, alterados a igdinsita con una matriz de labradorita y andesita y con abundante epidota. El basalto es vesicular y compacto.

Esta unidad presenta características fisiográficas bien definidas. En los sitios en que por erosión los derrames han sido cortados dejando remanentes, éstos destacan sobre el terreno en forma de mesetas con bordes abruptos.

Unidad Cuaternaria, Pleistoceno Clástico: Con este nombre se designa a los depósitos conglomeráticos de talud y abanicos aluviales, constituidos por peñascos, bloques y guijarros de composición variable. Morfológicamente, se presentan como lomeríos de suave relieve. La grava y conglomerado que constituyen a los abanicos aluviales y depósitos de talud, están constituidos por fragmentos angulosos y redondeados, en tamaños desde 20 cm hasta 1 m de diámetro, son de composición volcánica intrusiva contenidos en una matriz arenosa o tobácea y ocasionalmente bien cementadas.

Unidad Cuaternaria Reciente, Bermas: Unidad representada por depósitos arenosos de origen marino que indican el carácter progradante de la costa. Las antiguas líneas de costa se deben a la acción del oleaje y mareas que aportan los sedimentos hacia la alta playa y paulatinamente quedan fuera del alcance de la erosión marina.

La expresión morfológica de las antiguas líneas de costa, está indicada por grupos de alineaciones sensiblemente paralelas a la costa actual. Los sedimentos que constituyen las antiguas líneas de costa, varían ampliamente en cuanto a sus características litológicas. En general, están constituidos por arena de grano medio a fino, con dimensiones medias de 0.5 a 12 mm, con presencia de conchas fracturadas de pelecípodos en cantidades variables. La arena cuarzo-feldespática es de granos redondeados y subredondeados, ocasionalmente subangulares, la superficie de los granos es lisa y brillante.

Unidad Cuaternaria Reciente, Dunas Estabilizadas: Esta unidad agrupa las acumulaciones arenosas, de origen eólico, que han quedado fuera de la fuente de aporte de sedimento y que han sido fijadas por la vegetación o bien por la acción de las aguas circulantes. El sedimento arenoso que conforma las dunas estabilizadas es homogéneo, con ausencia de grava y concha, presenta granulometría fina con valores medios de 0.2 y 0.3 mm, bien clasificados, muestran dispersión mínima y ligero predominio de partículas finas.

Los granos de arena son redondeados, no están pulidos y presentan huellas de impacto. La consolidación lograda al estabilizarse la duna evidencia estratificación cruzada típica.

Unidad Cuaternaria Reciente, Llanuras Mixtas de Inundación: Son sedimentos limosos y arcillosos característicos de las zonas bajas, próximos a la desembocadura de los ríos y están sujetos a la acción de las mareas y al flujo del río. Los sedimentos finos, limos y arcillas, característicos de las llanuras mixtas de inundación, constituyen lodos negros, ricos en materia orgánica, no presentan estructura, aunque es posible observar laminaciones pequeñas de limo.

Unidad Cuaternaria Reciente, Llanuras de Inundación: Con esta denominación se conocen los depósitos sedimentarios aportados por los ríos y sus afluentes en la zona aluvial, albardones y canales fluviales. En la llanura de inundación se tienen a los sedimentos finos, limo y arcilla, con frecuencia micáceos y ricos en materia orgánica. Los sedimentos arenosos y arenos limosos se localizan en albardones, y las gravas en el lecho de los canales fluviales y esporádicamente en la llanura de inundación.

Unidad Cuaternaria Reciente, Playas: Con esta terminología se designa a los sedimentos arenosos de origen marino que se encuentran distribuidos en las costas. La expresión morfológica de las playas está indicada por su suave pendiente hacia el mar, de 10 a 20 m de amplitud con máximo de 40 m, salvo en zonas de erosión costera donde el desarrollo de las playas se reduce hasta su extinción. Los sedimentos propios de las playas, se clasifican como sedimentos arenosos de grano fino medio clasificados con valores medios de 1.0 a 0.15 mm, con predominio de partículas finas. Las estructuras observadas consisten en estratificación delgada y paralela, con discordancia angular debida a las condiciones propias del depósito y de la erosión, correspondiente al flujo y reflujos de la marea y la acción del oleaje.

Unidad Cuaternaria Reciente, Llanuras Intermareas: Con este término se denomina a las amplias áreas bajas sin relieve, localizadas hacia tierra adentro de las lagunas y barreras litorales inundables por la acción de las mareas. Estas llanuras muestran en su límite superior, un pequeño escarpe de erosión motivado por la acción erosiva de la marea ascendente y el oleaje por viento. Las llanuras intermareas están constituidas por sedimentos finos, arenas de grano medio a fino y limos. Ocasionalmente presentan materiales, redondeados y subangulosos, de constitución ígnea, metamórfica y sedimentaria; contienen escasos porcentajes de materia orgánica que varía entre 2 y 5 %, no presentan estructuras.

4.2 Geología estructural

Esfuerzos de Compresión (Deformaciones y plegamientos): Estos rasgos son observables en rocas precámbricas, paleozoicas y mesozoicas, disminuyendo su intensidad en relación inversa a su edad. Parte de la secuencia cenozoica muestra deformaciones incipientes, expresadas por cambios de inclinaciones de los estratos, pudiendo variar de 5° a 32°. De los análisis realizados en el área del acuífero, se puede llegar a las siguientes consideraciones: Las rocas metamórficas del mesozoico sufrieron cuando menos 3 épocas de deformación.

Las rocas mesozoicas pueden incluir sedimentos marinos carbonatados, rocas clásticas, así como parte de la secuencia inferior volcánica de composición andesítica. Estas rocas presentan estructuras producidas por esfuerzos de compresión, aunque en menor intensidad que en los niveles anteriores.

La secuencia de rocas volcánicas, formada por andesitas, riolitas y dacitas con sus tobas respectivas, se encuentran también deformadas principalmente por esfuerzos de compresión vertical. Aparentemente esta deformación fue favorecida por una gran cantidad de apófisis de intrusivos, provocando en algunos casos estructuras dómicas.

El resto de las rocas que forman la parte superior de la columna estratigráfica, formada por rocas clásticas continentales, piroclásticos, ignimbritas y derrames de rocas básicas, no presentan evidencias de haberse encontrado sometidas a esfuerzos de compresión.

Se pueden observar efectos de esfuerzos de compresión en las rocas desde el Precámbrico hasta el Mesozoico Tardío o Cenozoico Temprano, disminuyendo rápidamente de intensidad hacia edades menores, expresadas en estos últimos por fallas inversas de compresión de poca importancia y corto desplazamiento, así como plegamientos.

Esfuerzos de tensión (fallas normales y fracturas): La mayoría de las estructuras se asignan al Terciario Medio y Tardío y aún al Cuaternario. Estas estructuras se encuentran afectando a la totalidad de las rocas terciarias y algunas de las cuaternarias. De la misma forma afectan tanto a las ignimbritas que forman las mesetas altas como los basaltos del Pleistoceno, los cuales presentan sistemas poco desarrollados de fracturas y fallas. Los principales rasgos estructurales de este tipo presentan tres rumbos: noroeste, noroeste-noreste así como este-oeste y norte-sur; manifestándose en general por fallas de tipo normal y de poco desplazamiento.

El principal sistema de fallas, con rumbos noroeste de 5° a 36° está representado por un gran número de fallas de carácter regional, su actitud es marcadamente paralela a la línea de costa. Estas fallas forman a menudo el contacto entre dos tipos distintos de roca (contacto por falla).

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la información recopilada se puede deducir que el acuífero El Carrizo, se aloja en materiales granulares depositados sobre un estrato de rocas ígneas generalmente impermeables y ocasionalmente con permeabilidad anisótropa debido al fracturamiento.

La principal fuente de suministro de estos materiales es el afloramiento de rocas ígneas que constituyen los cerros o serranías que forman las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, los cuales en el área se extienden en algunos puntos hasta la proximidad del litoral costero.

Los materiales que tienen su origen en esta fuente están presentes en la porción media y alta de la cuenca, así como en sitios alejados del río, donde se observan depósitos de llanura deltáica y de llanura de inundación.

En la figura 3 se presenta una sección geológica esquemática longitudinal que muestra el funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

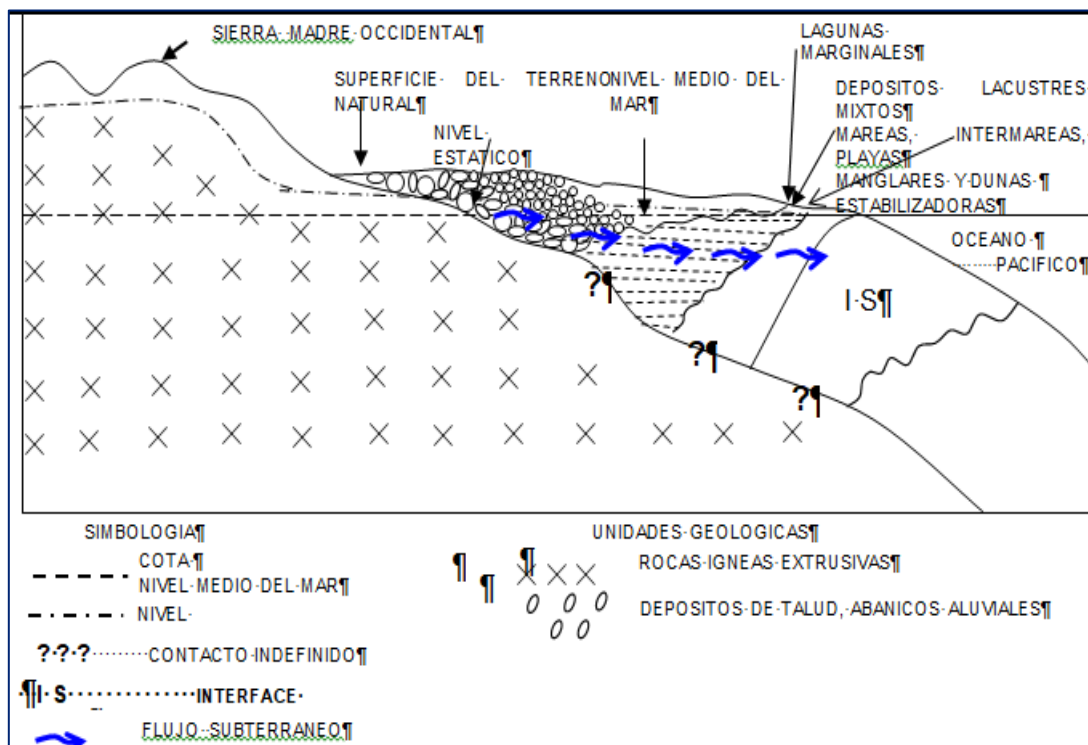


Figura 3. Sección geológica esquemática.

En la proximidad del litoral costero estos depósitos son debidos a regresiones del mar que dan origen a depósitos de playa, depósitos de dunas y bermas, que son materiales de granulometría más fina que los depósitos de llanura constituidos principalmente por gravas, arenas y boleos.

Esta unidad se encuentra limitada al norte, por afloramientos de rocas ígneas extrusivas que forman los cerros de Las Verás, El Sunesco y Las Uvas, entre otros; al sur y oriente, el Valle de Acaponeta, y al occidente la zona de inundación en la que se ubican las lagunas costeras.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de tipo libre y está contenido en materiales aluviales constituidos principalmente de arcillas, gravas y arenas de origen aluvio-fluvial, que presentan cambios importantes en su granulometría tanto en sentido vertical y horizontal, típicos de ambientes de depósitos deltáicos, lacustres y depósitos mixtos de tipo continental y palustres, marinos y eólicos. Hacia la línea costera se localizan depósitos evaporíticos asociados a antiguas lagunas cerradas y pantanos. Ocasionalmente el acuífero presenta condiciones locales de semiconfinamiento.

El espesor de estos depósitos se desconoce, pero es posible que alcance los 400 m reconocidos en los acuíferos vecinos al norte Fuerte-Mayo y Valle del Mayo, en el estado de Sonora.

Actualmente la extracción de agua subterránea en el valle es prácticamente nula y la principal limitante para el aprovechamiento de las aguas subterráneas someras es su calidad química debido a la concentración de sales en la mayor parte del acuífero, excepto en su porción alta.

La recarga que recibe el acuífero El Carrizo proviene principalmente de los retornos de riego agrícola, de la infiltración vertical de la lluvia y de los escurrimiento superficiales que se producen durante la temporada de lluvias. En cuanto a la descarga, podemos mencionar que se produce principalmente por la evapotranspiración en las zonas de niveles freáticos someros y por flujo horizontal. El bombeo es incipiente y ocurre hacia las estribaciones de la sierra.

5.2 Parámetros hidráulicos

Datos básicos para cuantificar la disponibilidad de agua subterránea y conocer el comportamiento de un acuífero, son los relativos a las propiedades hidráulicas del mismo, representadas por medio de los coeficientes de permeabilidad, transmisividad y almacenamiento.

No obstante, en estudios anteriores no se han realizado pruebas de bombeo y/o estimaciones a partir de las capacidades específicas o de los cortes litológicos de los pozos, por lo que los parámetros hidráulicos del acuífero de la región no han sido determinados, pero se tienen algunos datos basados en exploraciones geofísicas realizadas en la zona.

Sin embargo, por correlación geológica con los depósitos aluviales del acuífero Valle del Mayo, estado de Sonora (IMTA, 2004), se puede inferir a partir de las pruebas de bombeo realizadas en dicho acuífero, que el valor de la transmisividad varía de 5.8 a $13.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. El valor de la conductividad hidráulica varía de 5 a 25 m/d, en tanto que el valor del rendimiento específico oscila entre 0.05 y 0.15.

5.3 Piezometría

De acuerdo con la información existente, la profundidad al nivel del agua subterránea en la zona varía entre 1 y 15 m; la explotación se realiza por medios manuales principalmente a través de captaciones de tipo noria, cuyas profundidades alcanzan los 40 metros

El valor más alto se presenta en las estribaciones de la sierra de San Miguel y los valores más bajos ocurren hacia la costa. Los valores de profundidad al nivel del agua oscilan entre 1 y 3.5 m, en la mayor parte del valle. Debido a los grandes volúmenes de agua superficial utilizados para riego agrícola, los niveles estáticos se han recuperado de tal forma que se han ocasionado problemas de colmatación, por lo que se ha tenido que construir una importante red de drenaje parcelario y una extensa red de drenes para abatir los niveles estáticos.

En los estudios geohidrológicos realizados en la zona no se ha recabado información piezométrica; esto aunado a la prácticamente inexistencia de aprovechamientos subterráneos, hace difícil la elaboración de planos de configuración de los niveles estáticos. El abastecimiento de agua potable a los centros de población de la zona se realiza mediante el tratamiento de las aguas superficiales derivadas de las presas Miguel Hidalgo y Josefa Ortíz de Domínguez.

5.4 Comportamiento hidráulico

Con base en lo expuesto en los apartados anteriores, se puede inferir el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero que se describe a continuación. La recarga natural del acuífero proviene principalmente de la infiltración de los excedentes de los retornos del riego que utiliza agua superficial, de la infiltración de la lluvia y de los escurrimiento superficiales a lo largo de los arroyos.

Aunque la recarga principal proviene de la infiltración del agua superficial derivada de las presas que se utiliza en el distrito de riego, otra componente es la recarga debida a la precipitación, especialmente cuando la región es afectada por la presencia de huracanes. No existen manantiales en las zonas aledañas a las sierras ni en el valle, por lo que se deduce que la mayor parte del agua infiltrada se percola a profundidad para incorporarse al acuífero regional, que la transmite hacia las áreas de descarga bajo el control de la gravedad y de la estructura geológica. La descarga natural del acuífero tiene lugar principalmente por evapotranspiración en casi toda su superficie, debido a la existencia de niveles freáticos someros, y por flujo subterráneo horizontal hacia el estero de Capoa. De manera artificial, a través de los escasos aprovechamientos de agua subterránea.

La evapotranspiración de agua subterránea tiene lugar en las áreas donde los niveles freáticos están a menos de 10 m de profundidad, de manera que pueden ser alcanzados por las raíces de la vegetación nativa. Con respecto a las salidas horizontales, éstas tienden a ser mayores que las entradas horizontales, ya que reciben adicionalmente la aportación de los retornos de riego, que no son asimilables por el acuífero y que al elevar los niveles estáticos, se generan salidas del acuífero hacia el estero de Capoa. Actualmente estas descargas se encuentran en equilibrio, ya que los volúmenes por retornos de riego son muy superiores a los proporcionados por el flujo horizontal, debido a que la demanda de los usuarios de riego se mantiene estable y la oferta de aguas superficiales está garantizada.

Si se incrementa el volumen de agua superficial utilizada en el riego, se incrementan sus retornos de riego y esto ocasiona el ascenso de los niveles estáticos hasta un límite máximo proporcionado por la red de drenaje. Cuantitativamente los volúmenes de entradas y salidas por flujo subterráneo son muy inferiores a los volúmenes de los retornos de riego y la infiltración del agua superficial utilizada en la agricultura. Adicionalmente, no existe información hidrogeológica para estimar los volúmenes de entradas y salidas horizontales. Debido a esto, se considera que omitir la estimación de éstas componentes, no altera de manera significativa el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas del acuífero.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La información hidrogeoquímica de las muestras colectadas en los drenes revela que en la mayor parte de la superficie del acuífero el agua es de mala calidad debido a que supera la concentración de 1000 ppm de Sólidos Totales Disueltos (STD) que establecen las normas mexicanas para el agua destinada al consumo humano.

Las concentraciones de STD se incrementan conforme se avanza hacia la zona costera, en donde los valores superan las 10,000 ppm. Sólo en la parte alta del acuífero, hacia las estribaciones de la sierra, el agua es de buena calidad debido a su proximidad a las zonas de recarga natural que constituyen las elevaciones topográficas y la nula influencia de las zonas agrícolas, donde la calidad del agua se deteriora debido a los agroquímicos utilizados, la evapotranspiración y la infiltración de los retornos de riego.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Durante el recorrido que se realizó en junio de 2005, por administración, se encontró que la cantidad de aprovechamientos existentes dentro de la zona es pequeña, alrededor de 12 obras hidráulicas subterráneas pequeñas, con una extracción prácticamente nula. Para fines prácticos, debido a la magnitud de las otras componentes del balance de aguas subterráneas, se considera que la extracción es nula.

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

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

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

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

Considerando el gran volumen de los excedentes agrícolas producidos por el riego con agua superficial, comparado con la recarga que recibe por la infiltración del agua de la escasa lluvia, se observa un ascenso de los niveles del agua subterránea a tal grado que han hecho necesario la construcción de una red de drenes para abatirlos.

Bajo estas consideraciones, no existe cambio de almacenamiento, por lo que la ecuación de balance se reduce a, recarga igual a descarga.

7.1 Entradas

La recarga se determinó utilizando el método denominado “Balance de Agua Subterránea”, anteriormente descrito, en el cual se consideró como una incógnita la recarga vertical. Como criterio general, se obtuvieron los valores medios de los términos que intervienen en la evaluación, para deducir un valor conservador de la disponibilidad de agua subterránea.

La recarga principal al acuífero proviene de la infiltración de los excedentes de riego que utiliza agua superficial. En menor proporción existen entradas por la infiltración de la lluvia y de los escurrimientos superficiales a lo largo de los arroyos.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga natural que recibe el acuífero está conformada por la infiltración vertical del agua de lluvia y la infiltración de los escurrimientos superficiales. Estos términos están incluidos en la recarga vertical (Rv). Como se mencionó anteriormente, no existe información hidrogeológica para la estimación de las entradas subterráneas por flujo horizontal, pero este volumen es insignificante comparado con el que aporta la infiltración de los excedentes del riego. Por lo tanto la estimación de la recarga total es conservadora.

La recarga vertical (Rv) es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento es nulo, el bombeo es despreciable y no se estimarán las entradas y salidas subterráneas, su valor será despejado de la ecuación de balance planteada, la cual se puede escribir de la siguiente manera:

$$Rv + Rr - B - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Rr= Retornos de riego;

B= Bombeo;

ETR= Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$ =Cambio de almacenamiento;

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

$$Rv = B + ETR - Rr \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Retornos de Riego (Rr)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o de alcantarillado.

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Conforme a la información proporcionada por el Distrito de Riego No. 076, el volumen promedio de aguas superficiales que se destinan para riego es de **361 hm³ anuales**.

Considerando la granulometría de los suelos, la profundidad somera del nivel freático, la evaporación del agua subsuperficial y que gran parte del agua aplicada sale a través de los drenes, se consideró un coeficiente de infiltración del **30 %** para los retornos del riego. De esta manera, se tiene que del volumen de aguas superficiales aplicado en el riego sólo **108.3 hm³ anuales** se traducen en recarga efectiva al acuífero.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente evapotranspiración (ETR). El bombeo es despreciable y no existe descarga de flujo base. Los manantiales reportados en esta unidad son también de bajo rendimiento y afloran por contacto litológico o por control estructural, principalmente en las zonas serranas, son de régimen intermitente y se encuentran controlados principalmente por la época de lluvia, por lo que no representan una salida del acuífero.

7.2.1 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 toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Esta es la componente más importante de descarga del acuífero El Carrizo, debido a lo somero de los niveles freáticos. La evapotranspiración tiene dos componentes: la evaporación directa del agua subterránea y la transpiración de las plantas. La primera tiene lugar, donde aflora la superficie freática, así como en las áreas adyacentes a ésta, donde la misma superficie está poco profunda.

En el subsuelo, el agua puede ascender, a partir del nivel freático, hasta una altura ("la altura capilar") cuyo valor depende del tamaño de los poros o fisuras; en los materiales granulares esa altura es inversamente proporcional al tamaño de los granos, variando entre unos cuantos decímetros en las gravas, y cerca de tres metros en los materiales limo-arcillosos. Este mecanismo de descarga se presenta en la zona donde los niveles freáticos están a profundidades no mayores a 10 metros.

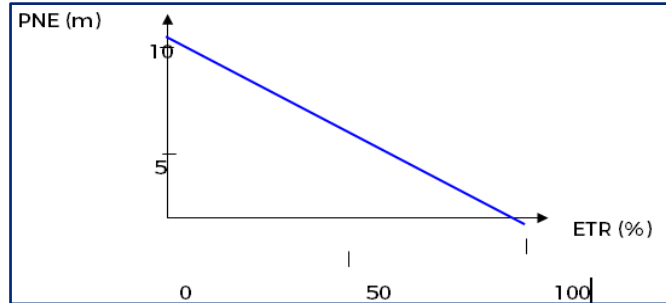
En la mayor parte de la superficie del acuífero se presentan niveles freáticos someros con profundidades menores a los 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de evapotranspiración real es de 379 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 25.7 °C y precipitación de 366 mm.

Fórmula de Turc:	$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$	$L = 300 + 25T + 0.05T^3$
	T (°C) = 27.5 P(mm) = 366 L = 2027.34375	P ² = 133956 L ² = 4110122.68
	ETR (mm) 379.0	

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



De la configuración de profundidad al NE mostrada en la figura No. 4, correspondiente a junio del 2005, se observa que todos los valores son menores a 10 m; se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (entre las curvas de 2 y 3 metros el valor promedio será 2.5, por ejemplo).

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso particular como el valor medio de profundidad es de 2.5 m, se multiplicará por 0.75 (que significa que a esta profundidad, el 75 % es susceptible de evapotranspirarse. Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados.

El valor de esta variable se estimó en 160 hm³ anuales, considerando un área de evapotranspiración de 565.8 km² (que corresponde a un 45% del área total del acuífero), y una profundidad media de 2.5 m, es decir, 565.8 km² (0.379 m) (0.75) = **160 hm³ anuales.**

7.2.2 Bombeo (B)

De acuerdo con la información recabada durante el recorrido de censo, se desprende que los aprovechamientos hidráulicos subterráneos son muy escasos y los volúmenes de extracción son mínimos.

En la parte correspondiente a la zona de recarga de este acuífero (sierra de San Miguel), la información recopilada no contiene datos precisos de los volúmenes extraídos por bombeo, la mayoría de los aprovechamientos identificados son norias, que extraen manualmente pequeños volúmenes destinados a satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

Esta información es consistente con la proporcionada por el REPDA donde se señala un volumen de extracción anual de 0.246 hm³, equivalente aproximadamente a 8 l/s. No obstante, los valores del REPDA son volúmenes concesionados y estos no necesariamente corresponden a la extracción real. Debido a que la extracción de agua subterránea es incipiente, se considera **nula**.

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

Debido al gran volumen de recarga que recibe el acuífero por los excedentes agrícolas producidos por el riego con agua superficial, comparado con la recarga por la infiltración del agua de la escasa lluvia que se produce en la zona, se observa un ascenso de los niveles del agua subterránea a tal grado que ha sido necesario la construcción de una red de drenes para abatirlos. Bajo estas consideraciones, no existe cambio de almacenamiento; es decir, $\Delta V(S)=0$.

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia y por las infiltraciones a lo largo de los arroyos, mediante la expresión (2):

$$\begin{aligned} R_v &= B + ETR - R_r \pm \Delta V(S) \\ R_v &= 0 + 160 - 108.3 + 0 \\ R_v &= 51.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + R_r \\ R &= 51.7 + 108.3 \\ R &= 160 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

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 **160.0 hm³/año**, de los cuales 51.7 hm³ anuales corresponden a la recarga natural por lluvia y los 108.3 hm³ restantes a la recarga inducida por los excedentes del riego.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **136.0 hm³ anuales**, que corresponde al 85% del volumen de evapotranspiración, para sostener el gasto ecológico, preservar el ecosistema costero y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

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 (REPD), 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 **2,928,219 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 160.0 - 136.0 - 2.928219 \\ \text{DMA} &= 21.071781 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **21,071,781 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. Norma Oficial Mexicana CNA. NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. "Servicios de Prospección y Ejecución de Sondeos Geofísicos en Diversas Zonas del Estado de Sinaloa". Realizado por la empresa CONSULTORES, S.A.